



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio de la influencia de la compactación en la permeabilidad y la resistencia a compresión de hormigones porosos

Trabajo realizado por:

Roger Ximenes Miralles

Dirigido por:

Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro

Codirigido por:

Ricardo Pieralisi

Grado en:

Ingeniería de Obras Públicas

Barcelona, **Junio 2016**

Universitat Politècnica de Catalunya

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE GRADO

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las personas y entidades que han hecho posible que yo realizara este trabajo final de grado. Gracias a cada uno de los que han contribuido para que este trabajo sea una realidad.

Primero de todo, me gustaría agradecer a la Universitat Politècnica de Catalunya, y más concretamente a l'Escola Tècnica Superior de Camins, Canals i Ports de Barcelona, por todo lo que he aprendido estos años. Sin ninguna duda, esta formación adquirida me ha aportado unos conocimientos que me servirán a lo largo de mi carrera profesional y, también, en mi vida personal. El trabajo final de grado es la guinda que culmina este aprendizaje.

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la inestimable ayuda de la gente del Laboratorio de Estructuras del Campus Nord de la UPC. Una parte de este trabajo es de Robert, Tomás, Camilo y compañía, que siempre estuvieron dispuestos a ayudar en el desarrollo de la campaña experimental.

Pero, sin ninguna duda, las personas que más me han ayudado a lo largo del proceso han sido Sergio y Ricardo. Ambos me han guiado a lo largo del viaje y les quiero agradecer las horas dedicadas y el esfuerzo que ha supuesto. A Ricardo le doy las gracias por la ayuda durante la parte experimental del trabajo. También me gustaría agradecerle que me ofreciera su tesis doctoral como base de mi estudio. A Sergio le agradezco la tutorización durante la redacción del trabajo. Su punto de vista crítico y su afán de mejora me han ayudado a hacer un mejor trabajo.

Por último, me gustaría dar las gracias a las personas más importantes de mi vida. Sin ellas no sé qué haría. Le doy las gracias a mis padres, Miquel i Silvia, por estar siempre a mi lado y tratar de darme lo mejor en todo momento. Le agradezco a mi hermana, Carla, porque es la alegría de mi corazón. Estaré infinitamente agradecido a mis abuelos, Carmen, Marcel·lí, Mercè i Manel, por el amor incondicional que me han brindado desde pequeño. Finalmente a mi pareja Núria, le doy las gracias por estos 3 maravillosos años juntos, y por muchos más. El apoyo y la confianza que me dan cada día son la mejor recompensa que uno puede tener.

RESUMEN

Los hormigones porosos se caracterizan por su elevada porosidad. Por un lado, los vacíos generados pueden contribuir a la permeabilidad del material, dándole funcionalidad drenante. Por otro lado, esto también conlleva una reducción de las propiedades mecánicas. El equilibrio entre el comportamiento mecánico y la permeabilidad está relacionado con la composición de la mezcla y con el grado de compactación durante la ejecución. Teniendo esto en cuenta, el objetivo del presente estudio es evaluar la relación entre la compactación y el comportamiento del material. En este trabajo final de grado se busca profundizar en el comportamiento del hormigón poroso. La caracterización del material se antoja indispensable para hacer del hormigón poroso un material de uso común y estandarizado.

Para poder evaluar la relación entre la compactación y el comportamiento del material se realizó una campaña experimental en la cual las variables de estudio fueron el grado de compactación de las probetas y la cantidad de cemento aplicada a la mezcla. Así se pudo evaluar la influencia del proceso de compactación y de la dosificación de materiales en el comportamiento general del material y en sus propiedades. Se centró la investigación en la influencia de estos factores sobre las propiedades hidráulicas (a través de la permeabilidad) y de las propiedades mecánicas (a través de la resistencia a compresión y a tracción). Se fabricaron 120 probetas de hormigón poroso, que se dividieron en 12 tipologías según las variables del estudio. Así se pudo estudiar claramente cómo afecta cada variable.

Además de la campaña experimental, se realizó una documentación previa con toda la información de investigaciones existentes que guardase relación con lo que se trabajó en el estudio. Se hizo una búsqueda para encontrar autores que trabajaron el proceso de compactación en hormigones porosos con anterioridad. La idea fue aportar toda la información necesaria para que el lector entienda los resultados de la campaña experimental y comprenda el análisis de dichos resultados.

Los resultados muestran que el grado de compactación es el factor determinante en todas las propiedades del hormigón poroso. Las perspectivas de mejora del material pasan por encontrar un método numérico que encuentre, para cada caso particular, el proceso de compactación óptimo, obteniendo el equilibrio entre el valor de permeabilidad y el valor de resistencia mecánica.

SUMMARY

Pervious concrete is known for his high values of porosity. On one hand, the voids generated on the mix can contribute to the permeability of the material. This contribution turns out into a good draining functionality. On the other hand, this also becomes a reduction of mechanical properties. The balance between the mechanical strength and the permeability is related to the mixture composition and the compaction degree during execution. Knowing that, the goal of this study is evaluate the relationship between compaction and behavior of the pervious concrete. The material characterization seems important for pervious concrete. So, studying his properties it is a way to improve the material.

An experimental campaign was done to evaluate the relationship between the compaction and the material behavior. The variables used were the compaction degree and the amount of cement applied to the mixture. So it could be evaluated the influence of the compaction process and dosing of materials in the general behavior of the material and its properties. The research focused on the influence of these factors on the hydraulic properties (permeability) and mechanical properties (compressive strength and tensile strength). 120 specimens of porous concrete were produced. The specimens were divided in 12 specimens types, according to the study variables. With the experimental work could be studied how it affects each variable.

In addition to the experimental campaign, a preliminary documentation was done to collect information about previous investigations on the pervious concrete. Some existing research was useful to understand the meaning of results and conclusions achieved in the study. The idea was to provide useful information for the reader. The reader should have all the information, and it also has to be concise.

The results show that the compaction degree is the key factor in all the properties of porous concrete. The future prospects for material improvement pass through finding a numerical method to find the optimal compaction process for each particular case, obtaining the balance between the value of permeability and mechanical strength value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Estudio de la urbanización a escala mundial; (a) Superficies impermeables construidas (2000-2001); (b) Casos reportados de inundaciones (1985-2010); [Pieralisi (2016)].....	1
Figura 1.2 -	Introducción al hormigón poroso; (a) Permeabilidad del hormigón poroso; (b) Comparación del comportamiento hidráulico del hormigón poroso frente al convencional [Zhong <i>et al.</i> (2015)].....	2
Figura 1.3 -	Influencia del grado de compactación en la distribución de las partículas; (a) Tipologías de contactos entre partículas según el grado de compactación; (b-c) Distribución de partículas con grado de compactación de 1,67% y 16,67%, respectivamente; [Pieralisi (2016)].....	3
Figura 1.4 -	Estructura del trabajo ‘Estudio del proceso de compactación, la permeabilidad y el ensayo de compresión de hormigones porosos’.....	4
Figura 2.1 -	Organización del capítulo número 2: Estado del Conocimiento.....	7
Figura 2.2 -	Aspecto del hormigón poroso endurecido	8
Figura 2.3 -	Relación agua/cemento: comparación de las investigaciones respecto a los límites establecidos por la ACI522 (2010).....	11
Figura 2.4 -	Normativas para la determinación de las propiedades de los áridos; (a) tamices para la determinación de la granulometría del árido; (b) Morfología de los áridos atendiendo a sus dimensiones [adaptado de ECLAP (2016)].....	12
Figura 2.5 -	Principales adiciones en el hormigón; (a) Apariencia de las cenizas volantes; (b) Apariencia del humo de sílice	13
Figura 2.6 -	Influencia de la energía de compactación y de la cantidad de cemento en el contenido de aire [adaptado de Ghafoori (1995)].....	18
Figura 2.7 -	Influencia de la energía de compactación y de la cantidad de cemento en la densidad [adaptado de Ghafoori (1995)].....	19

Figura 2.8 -	Ensayo de permeabilidad en hormigón poroso; (a) Estructura general de ambos ensayos; (b) Funcionamiento del ensayo de Permeámetro Variable; (c) Funcionamiento del ensayo de Permeámetro Constante.....	20
Figura 2.9 -	Influencia de la energía de compactación y de la cantidad de cemento en la permeabilidad [adaptado de <i>Ghafoori</i> (1995)].....	23
Figura 2.10 -	Influencia de la energía de compactación y de la cantidad de cemento en la resistencia a compresión [adaptado de <i>Ghafoori</i> (1995)].....	25
Figura 2.11 -	Aplicaciones del hormigón poroso; (a) Estacionamiento de vehículos; (b) Pista de tennis; (c) Firme para viandantes;	26
Figura 3.1 -	Organización del apartado número 3: Metodología	29
Figura 3.2 -	Procesos de fabricación, compactación y almacenamiento; (a) Máquina mezcladora de mortero 65/2 K-3; (b) Dimensiones de los moldes; (c) Estructura de la máquina compactadora	32
Figura 3.3 -	Ensayo peso hidrostático; (a) Balanza hidrostática; (b) Elementos del ensayo de peso hidrostático; (c) Funcionamiento del ensayo de peso hidrostático	33
Figura 3.4 -	Piezas del permeámetro de carga constante; (a) Pernos circulares; (b) Pieza de PVC de la parte inferior; (c) Pieza de PVC de la parte superior.....	34
Figura 3.5 -	(a-e) Pasos para la construcción del permeámetro de carga constante....	35
Figura 3.6 -	Ensayo de permeabilidad con permeámetro de carga constante; (a) Colocación del permeámetro; (b) Esquema del ensayo de permeabilidad.....	36
Figura 3.7 -	Ensayo de resistencia a compresión; (a) Montaje del ensayo de resistencia a compresión en la presente campaña experimental; (b) Esquema del ensayo de resistencia a compresión	37
Figura 3.8 -	Figura 3.8. Ensayo de resistencia a tracción indirecta; (a) Montaje del ensayo de resistencia a tracción indirecta en la campaña experimental; (b) Dispositivo de ensayo para probetas cilíndricas [UNE-EN 12390-6 (2001)].....	38
Figura 4.1 -	Organización del capítulo número 4: Resultados	40

Figura 4.2 -	Curvas de compactación numéricas comparadas con campaña experimental [<i>Pieralisi</i> (2016)].....	41
Figura 4.3 -	Curvas de compactación de modelo teórico existente con el modelo teórico 2D desarrollado [<i>Pieralisi</i> (2016)].....	42
Figura 4.4 -	Hipótesis sobre la influencia de la porosidad sobre otras propiedades del material	43
Figura 4.5 -	Influencia del grado de compactación (%) en la porosidad del hormigón poroso	45
Figura 4.6 -	Valores de densidad según la cantidad de cemento; (a-d) La cantidad de cemento varía entre 300 y 450 kg/m ³	47
Figura 4.7 -	Valores de densidad de las probetas de hormigón poroso	48
Figura 4.8 -	Influencia del grado de compactación en la densidad del hormigón poroso.....	48
Figura 4.9 -	Valores de permeabilidad según la cantidad de cemento; (a-d) La cantidad de cemento varía entre 300 y 450 kg/m ³	50
Figura 4.10 -	Resultados del ensayo de permeabilidad en función de la porosidad.....	51
Figura 4.11 -	Influencia del grado de compactación en la permeabilidad del hormigón poroso.....	52
Figura 4.12 -	Valores de resistencia a compresión según la cantidad de cemento; (a-d) La cantidad de cemento varía entre 300 y 450 kg/m ³	53
Figura 4.13 -	Resultados del ensayo para la determinación de la resistencia a compresión.....	54
Figura 4.14 -	Influencia del grado de compactación en la resistencia a compresión del hormigón poroso.....	55
Figura 4.15 -	Valores de resistencia a tracción según la cantidad de cemento; (a-d) La cantidad de cemento varía entre 300 y 450 kg/m ³	56

Figura 4.16 - Resultados del ensayo para la determinación de la resistencia a tracción.....	57
Figura 4.17 - Influencia del grado de compactación en la resistencia a tracción del hormigón poroso.....	58
Figura 5.1 - Número de investigaciones científicas en los últimos 20 años [<i>Pieralisi</i> (2016)].....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 -	Valores de agua/cemento para diferentes estudios.....	10
Tabla 2.2 -	Método de prueba error para la dosificación del hormigón poroso.....	16
Tabla 2.3 -	Rangos de porosidades según investigadores; EXTRAS: (1) Áridos Finos; (2) Adiciones; (3) Aditivos; (4) Polímeros; (5) Fibras; (6) Látex.....	17
Tabla 2.4 -	Valores de densidad de estudios de hormigón poroso comparados con la porosidad	19
Tabla 2.5 -	Ensayo de permeabilidad en diferentes estudios; EXTRAS: (1) Áridos Finos; (2) Adiciones; (3) Aditivos; (4) Polímeros; (5) Fibras; (6) Látex; (7) Caucho.....	22
Tabla 2.6 -	Ensayo de resistencia a compresión en diferentes estudios; EXTRAS: (1) Áridos Finos; (2) Adiciones; (3) Aditivos; (4) Polímeros; (5) Fibras; (6) Látex; (7) Caucho	24
Tabla 3.1 -	Nomenclaturas de los diferentes hormigones porosos fabricados.....	30
Tabla 3.2 -	Dosificaciones del hormigón poroso.....	31
Tabla 4.1 -	Resumen de los resultados de porosidad clasificados según nomenclatura.....	44
Tabla 4.2 -	Comparación de la reducción de porosidad en función del grado de compactación	45
Tabla 4.3 -	Resumen de los resultados de densidad clasificados según nomenclatura.....	46
Tabla 4.4 -	Resumen de los resultados de permeabilidad clasificados según nomenclatura.....	49

Tabla 4.5 -	Resumen de los resultados de resistencia a compresión clasificados según nomenclatura.....	52
Tabla 4.6 -	Resumen de los resultados de resistencia a tracción clasificados según nomenclatura.....	55

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.4 DESCRIPCIÓN Y ESTRUCTURA DEL ESTUDIO	4
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
2.1 INTRODUCCIÓN	7
2.1.1 DEFINICIÓN DE HORMIGÓN POROSO	8
2.2 MATERIALES	9
2.2.1 CEMENTO Y AGUA	9
2.2.2 AGREGADOS	11
2.2.3 ADICIONES	13
2.2.4 ADITIVOS	14
2.3 DOSIFICACIÓN.....	14
2.4 PROPIEDADES	16
2.4.1 POROSIDAD	16
2.4.2 DENSIDAD	18
2.4.3 PERMEABILIDAD	20
2.4.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	24
2.5 APLICACIONES	25
3. METODOLOGÍA	29
3.1 INTRODUCCIÓN	29
3.2 VARIABLES DEL ESTUDIO	30
3.3 MATERIALES	30
3.6 COMPACTACIÓN.....	32
3.7 ALMACENAMIENTO	33
3.8 ENSAYOS.....	33
3.8.1 ENSAYOS DE POROSIDAD Y DENSIDAD	33
3.8.2 ENSAYOS DE PERMEABILIDAD	34
3.8.2 ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA	36
4. RESULTADOS	40
4.1 INTRODUCCIÓN	40
4.2 PROCESO DE COMPACTACIÓN.....	41
4.3 POROSIDAD.....	43
4.4 DENSIDAD.....	46
4.5 PERMEABILIDAD	49
4.6 RESISTENCIA A COMPRESIÓN	52
4.7 RESISTENCIA A TRACCIÓN.....	55
5.CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	60
5.1 CONCLUSIONES GENERALES	60
5.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	61
5.2.1 POROSIDAD	61
5.2.2 DENSIDAD	62
5.2.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS.....	62
5.2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS	63
5.3 PERSPECTIVAS FUTURAS	64
REFERENCIAS	66

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

Durante las últimas décadas, el mundo de la construcción ha experimentado un crecimiento destacable. Dicho crecimiento se debe, básicamente, a dos factores: el auge económico/tecnológico y el aumento de la población. Para satisfacer las necesidades generadas por esta población creciente, las zonas urbanizadas han crecido respecto a la totalidad del territorio. La urbanización se ha caracterizado por dotar de impermeabilidad a las superficies debido a la construcción de carreteras, edificios y zonas de aparcamiento, entre otros.

La figura 1.1.a., adaptada por *Pieralisi* (2016) del trabajo de *Vorosmarty et al.* (2010), muestra el porcentaje de superficies impermeables construidas y su densidad en los años 2000 y 2001. La figura 1.1.b. muestra los principales casos de inundaciones producidos en el período comprendido entre 1985 y 2010.

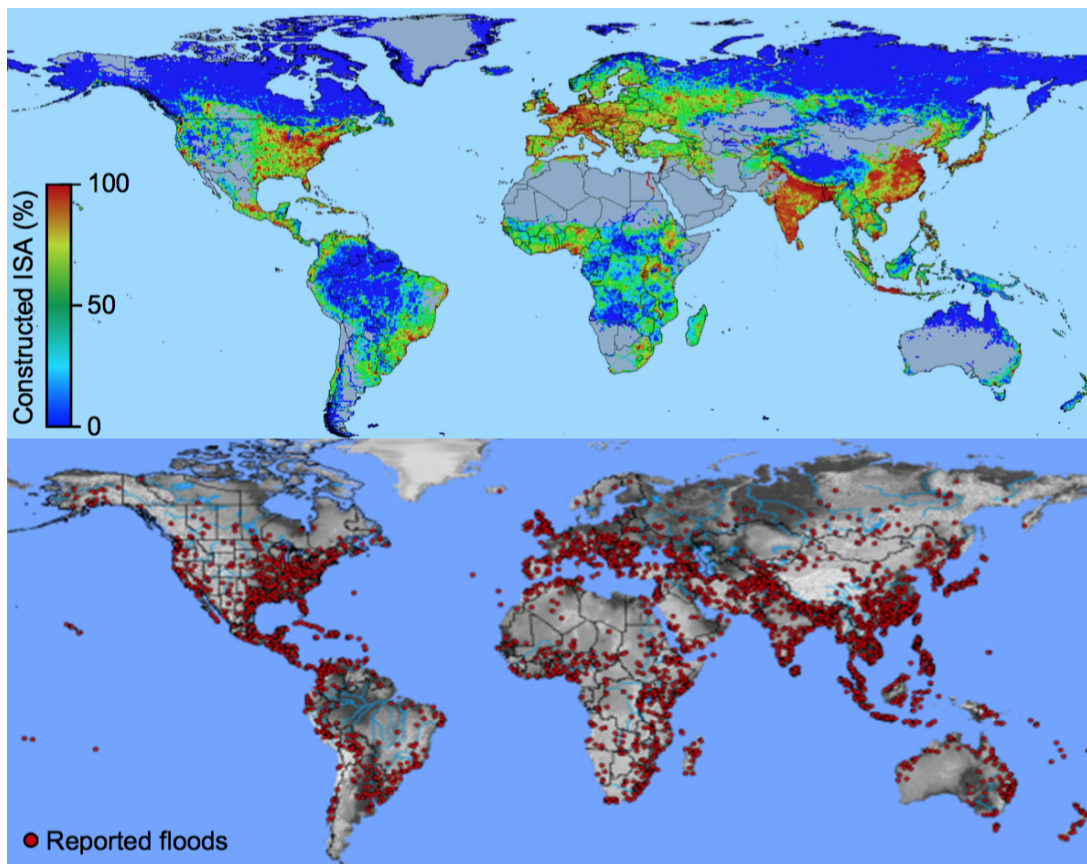


Figura 1.1. Estudio de la urbanización a escala mundial; (a) Superficies impermeables construidas (2000-2001); (b) Casos reportados de inundaciones (1985-2010); [*Pieralisi* (2016)];

Tras analizar las figuras 1.1.a. y 1.1.b. se observa que hay una relación directa entre las superficies impermeables construidas y las inundaciones. La mayoría de casos de inundaciones se producen en zonas donde el porcentaje de superficies impermeables es elevado. Si bien es cierto que el problema de las inundaciones se podría haber tratado e investigado con más antelación, nunca supuso una preocupación. No ha sido hasta el siglo XXI que se ha tratado este asunto como un problema a resolver.

Si se ha empezado a hacer trabajo de investigación es porque en los últimos años ha habido factores que han condicionado la metodología de trabajo. Primero de todo, el sector ha sufrido un cambio por aspectos económicos. Por culpa de la crisis económica, que ha azotado y sigue castigando gran parte del territorio mundial, los proyectos han sufrido un mayor control y los presupuestos se han ajustado drásticamente. También han afectado mucho en este cambio los factores medioambientales. Actualmente los factores medioambientales representan un elemento clave a la hora de determinar y condicionar la viabilidad de los proyectos ingenieriles. Las normativas y regulaciones han aumentado considerablemente en exigencia estos años. Por último, los factores sociales son un elemento más en este engranaje de cambio en la mentalidad del sector. Cada vez es más relevante el impacto social de los proyectos y su repercusión.

Todos estos condicionantes han llevado a los ingenieros a mejorar y buscar soluciones que cumplan con los requisitos de los nuevos tiempos. Eso implica descubrir nuevos métodos, nuevos materiales y nuevas ideas con el objetivo de encontrar la eficiencia máxima para alcanzar los resultados y las exigencias requeridas.

Debido a estos cambios, la ingeniería está buscando nuevos caminos para actualizar sus características delante de los nuevos requerimientos. Las soluciones para reducir las inundaciones causadas por la impermeabilidad de las superficies construidas pasan por encontrar un material que sea permeable. En el caso de los pavimentos, el hormigón poroso es una opción que puede ayudar a solucionar esta problemática. Tal y como muestra la figura 1.2.a., el hormigón poroso tiene la capacidad de filtrar el agua a través de su estructura ya que está formado básicamente por áridos gruesos cubiertos por una fina capa de pasta de cemento. Esta mezcla crea una estructura de poros interconectados en el interior del material que le proporcionan permeabilidad.

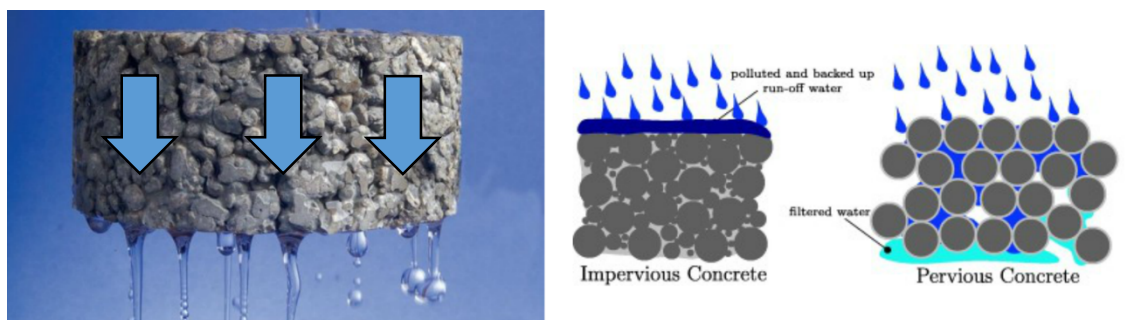


Figura 1.2. Introducción al hormigón poroso; (a) Permeabilidad del hormigón poroso; (b) Comparación del comportamiento hidráulico del hormigón poroso frente al convencional [Zhong *et al.* (2015)];

La figura 1.2.b. expone el mejor funcionamiento de filtración del hormigón permeable respecto al hormigón impermeable. Mientras el hormigón convencional no es capaz de filtrar el agua a través de su estructura interna, la naturaleza del hormigón permeable le

permite responder mejor ante esta necesidad de transporte de agua. Con lo cual, el hormigón poroso es la opción que puede implantarse si se quiere solucionar las dificultades de inundaciones.

1.2 PROBLEMA

Como ya se ha comentado, uno de los principales problemas de la creciente urbanización es el riesgo de inundaciones. Por este motivo, este proyecto estudia las capacidades de un material alternativo para plantear una nueva solución, que permita reducir este riesgo. Así pues, si se sustituyeran los pavimentos impermeables actuales por otros de hormigón poroso podrían evitarse buena parte de las dificultades por inundaciones. Si bien es cierto que hay una falta de investigación sobre el hormigón poroso, los estudios que analizan sus propiedades y sus características han aumentado en los últimos 20 años de manera progresiva. A pesar de esto, los obstáculos para su utilización impiden su implementación global a corto plazo.

Gracias a las investigaciones realizadas hasta el momento, se sabe que el diseño de la mezcla es uno de los factores clave para determinar las propiedades y el desempeño del hormigón poroso. Otros factores muy importantes son las propiedades del agregado, la compactación y las técnicas de puesta en obra (*Suleiman et al; 2006*).

En esta campaña experimental, para estudiar el diseño de la mezcla y su comportamiento, la principal variable será la cantidad de cemento que se añadirá. El principal problema respecto a la dosificación es que no existe una normativa específica para su evaluación.

El trabajo también se centrará en el efecto que tiene el grado de compactación sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso. Más concretamente, en su influencia sobre la permeabilidad y la resistencia a compresión. La compactación es el proceso de aplicar energía al material para reducir los espacios vacíos, aumentando así su densidad y en consecuencia, sus propiedades mecánicas. Este proceso es aún más importante en el caso de materiales de mezcla rígida, como el hormigón poroso.

La figura 1.3 (*Pieralisi (2016)*) muestra una simulación del efecto del grado de compactación sobre una muestra de hormigón poroso. Aunque la compactación es un proceso determinante para la obtención de las propiedades, el problema que existe es que no hay literatura suficiente para controlarla. Este estudio tratará de avanzar en el conocimiento de la compactación para hormigón poroso. Además, se revisarán otras problemáticas como la falta de trabajabilidad, la baja resistencia a compresión, la pérdida de agregados o la incertidumbre sobre la durabilidad.

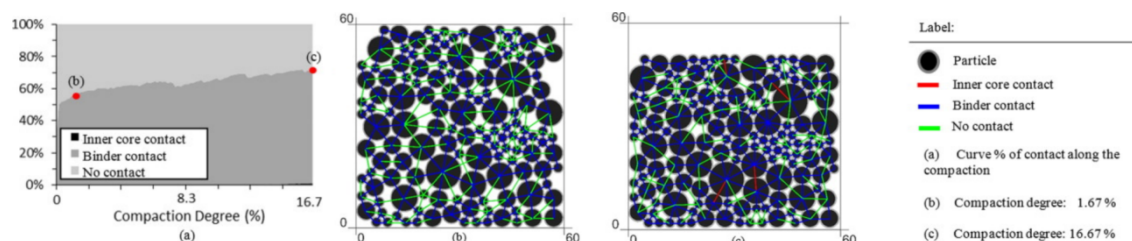


Figura 1.3. Influencia del grado de compactación en la distribución de las partículas; (a) Tipologías de contactos entre partículas según el grado de compactación; (b-c) Distribución de partículas con grado de compactación de 1,67% y 16,67%, respectivamente; [*Pieralisi (2016)*];

Otro de los principales problemas del hormigón poroso es la pérdida de resistencia debido al aumento de la permeabilidad y de la porosidad respecto al hormigón convencional. De hecho, este es el principal problema para la implementación del material. La pérdida considerable de resistencia disminuye su eficiencia. Por este motivo, la clave es encontrar el punto de equilibrio entre un valor de permeabilidad suficiente y una resistencia mecánica capaz de soportar las solicitaciones a las cuales se ve sometido el material.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio es profundizar en el conocimiento del hormigón poroso y sus propiedades. Más concretamente el trabajo tiene como objetivos:

- Estudiar las propiedades (densidad, permeabilidad y resistencia) en función de la porosidad. La porosidad es la principal característica del hormigón poroso. Por eso, el resto de propiedades serán analizadas a través de la porosidad y su influencia en ellas.
- Identificar la influencia del grado de compactación y de la cantidad de cemento (relación árido/pasta) en el comportamiento de los hormigones porosos en cuanto a su resistencia, su permeabilidad y sus propiedades físicas. Ambas características van a ser las variables que servirán de referencia para entender el comportamiento del hormigón poroso.
- Comparar los resultados que se van a obtener en la parte experimental de la investigación con la literatura relacionada del hormigón poroso. ¿Coincide lo que acontece con las muestras ensayadas con lo que se conocía anteriormente del material? ¿Por qué coincide? ¿O por qué no lo hace?

1.4 DESCRIPCIÓN Y ESTRUCTURA DEL ESTUDIO

El estudio consiste en la elaboración, preparación y experimentación de hormigón poroso para profundizar en su comportamiento mecánico e hidráulico en función del grado de compactación y de la cantidad de cemento. Gracias a estas variables y a sus múltiples combinaciones se obtendrán resultados que permitirán ver si los objetivos y/o hipótesis eran correctos y poder sacar unas conclusiones de esta investigación.

Se realizará el trabajo a partir de ensayos en el laboratorio con probetas de hormigón poroso. El documento que englobará toda la información necesaria sobre el estudio del material se organizará de la siguiente manera: Introducción; Estado del conocimiento; Metodología; Resultados y análisis y, por último, Conclusiones y perspectivas futuras, como se muestra en la figura 1.4.



Figura 1.4. Estructura del trabajo ‘Estudio del proceso de compactación, la permeabilidad y el ensayo de compresión de hormigones porosos’;

En los primeros capítulos se expondrá toda la información y búsqueda previa que se ha hecho sobre este campo y este material. Después, se determinará la manera de trabajar y los procesos a seguir para estudiar las distintas variables. Una vez definido el modo de operar, el siguiente capítulo contendrá toda la información experimental, donde se fabricarán y ensayarán aproximadamente 120 probetas que darán unos resultados que, posteriormente, se analizarán y se usarán para sacar las conclusiones del trabajo.

A través de estos apartados se descubrirán, las características básicas del hormigón poroso a través del ensayo de permeabilidad y de los ensayos para determinar la resistencia de compresión y de flexión. Así pues, la finalidad del estudio es poder entender con mayor seguridad el comportamiento del hormigón poroso que, sin ninguna duda, es un material con presente pero, sobre todo, con mucho futuro.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

Si bien es cierto que el hormigón poroso es un material en fase de desarrollo, actualmente existen investigaciones y estudios que empiezan a detallar sus características. En este capítulo se revisarán de los estudios previos llevados a cabo por otros autores sobre la temática relacionada con el presente trabajo.

El objetivo de este capítulo es introducir todo el conocimiento necesario para poder entender e interpretar los resultados obtenidos durante el experimento. Así pues, este capítulo será vital para comparar si lo estudiado hasta el momento sobre el hormigón poroso coincide con los resultados que se han obtenido en el laboratorio. Por lo tanto, ésta será la base sobre la cual se va a sostener la investigación de este trabajo.

Como muestra la figura 2.1. este capítulo se divide en 5 partes: Introducción, Materiales, Dosificación, Propiedades y Aplicaciones. En el apartado de *Introducción* se enumeran los objetivos del capítulo, se muestra su organización y se hace una breve explicación sobre las generalidades del material. En *Materiales* se detallan las características de los componentes que forman el hormigón poroso. En *Dosificación* se analizan los procedimientos y sus particularidades a la hora de fabricar el material. En *Propiedades* se investigan los antecedentes para definir sus propiedades básicas y por último, en *Aplicaciones* se mostrarán los usos principales del hormigón poroso.

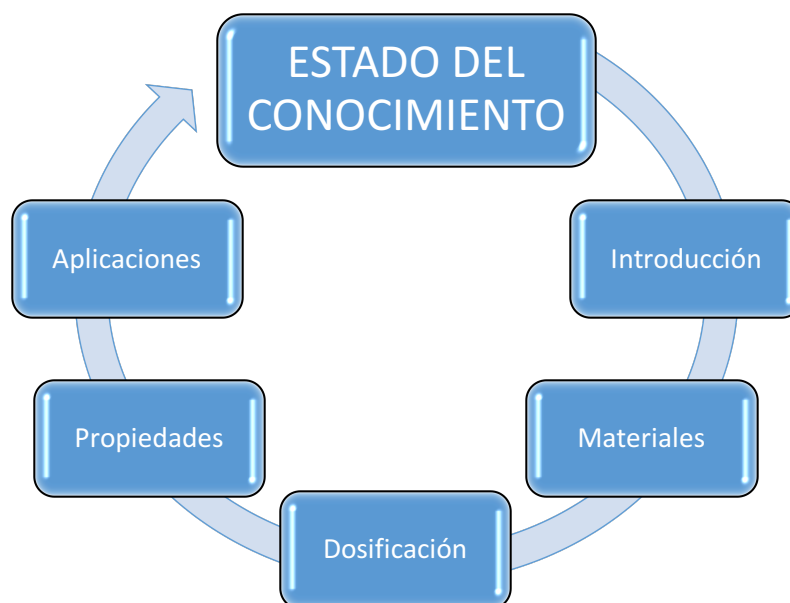


Figura 2.1. Organización del capítulo número 2: Estado del Conocimiento;

En conclusión, a lo largo de este capítulo se mostrarán resultados de la investigación sobre hormigón poroso de varios estudios. La finalidad de mostrar estos resultados no es sólo poder caracterizar las propiedades del material, sino también usar estos resultados para poder entender la magnitud y las posibilidades de un material como el hormigón poroso. Por este motivo, aunque este documento es un estudio de la influencia de la compactación y la dosificación del hormigón poroso, su intención también es divulgar las características de este material.

2.1.1 DEFINICIÓN DE HORMIGÓN POROSO

El hormigón poroso es, tal y como lo define la normativa americana *ACI 522* (2010), un material compuesto básicamente por cemento, árido grueso, poco o nada de árido fino y agua. También se pueden incluir adiciones, tales como humo de sílice o cenizas volantes. Incluso se pueden añadir aditivos para mejorar el comportamiento del material. En el siguiente apartado se hablará en mayor profundidad de los diferentes componentes que forman el hormigón poroso.

La mezcla de estos materiales proporciona un material endurecido con la apariencia que se muestra en la figura 2.2. Como se observa en la figura, a simple vista predominan las partículas de árido grueso. La pasta de cemento y el árido fino (si se incluye) no tienen tanto protagonismo visual como tiene el árido grueso en el hormigón.



Figura 2.2. Aspecto del hormigón poroso endurecido;

Este material endurecido con poros conectados, de unos 2 a 8 milímetros de tamaño que permiten que el agua lo atravesase fácilmente. Según lo investigado hasta el momento (*ACI 522*; 2010), y tras el proceso de compactación, el contenido de vacío varía entre el 15 y el 35 %. Con materiales que mejoran el rendimiento del hormigón se han obtenido valores de resistencia de compresión variables que llegan hasta los más de 60 MPa. El ratio de drenaje varía según el tipo de mezcla y su densidad, pero estará entre los 81 y 730 L/min/m² (1,4 y 12,2 mm/s). Estos valores son simples referencias de las posibilidades del hormigón poroso.

2.2 MATERIALES

Como se mostrará más adelante, la dosificación y la compactación son factores importantes para determinar las propiedades del hormigón poroso. A pesar de esto, estudiando las características individuales de los materiales que forman el hormigón poroso también se puede obtener mucha información relevante. Por ejemplo, la cantidad de cemento y las propiedades de los áridos son algunos de los agentes que determinan claramente los atributos del hormigón poroso.

Por este motivo, el objetivo de este apartado es identificar cada uno de los materiales que conforman la mezcla y establecer sus propiedades. A continuación se presentan uno por uno y se explicarán sus características e influencia en la elaboración del hormigón poroso.

2.2.1 CEMENTO Y AGUA

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece. El desarrollo del fraguado y el endurecimiento se consigue por medio de reacciones y procesos de hidratación. Una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad (*UNE-EN 197-1* (2011)). El cemento Portland, conforme a la normativa *ACI522* (2010), es el material cementante que se usa como aglomerante principal. El uso de cemento en las mezclas de hormigón se rige por la normativa *UNE-EN 197-1* del año 2011. El Portland, es el cemento más común en la construcción. También se pueden usar, como complemento al Portland, los materiales puzolánicos (en el apartado 2.2.3 se muestran las principales opciones para las adiciones).

La calidad del agua para hormigón poroso está limitada por las mismas normativas y leyes del hormigón convencional. En España se sigue la norma *UNE 83951* (2008). Como se especifica en la *EHE-08* (2008), el agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón, no debe contener ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del mismo. Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deberán analizarse las aguas y determinar que cumplen los límites establecidos como válidos.

La relación de agua/cemento (a/c) es un factor importante en la caracterización del hormigón. En el hormigón convencional la relación a/c determina la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco. En el caso del hormigón poroso la determinación de la relación a/c para el desempeño del material es crucial. La pasta de cemento debe ser suficientemente fluida para ser trabajable pero, a la vez, debe ser capaz de mantener la mezcla unida ya que la heterogeneidad de la misma dificulta la unión. Por ello, el valor de la relación a/c en hormigón poroso es tan importante y obtener el valor óptimo de este ratio se vuelve imprescindible para el correcto funcionamiento del hormigón poroso.

Según la *ACI522* (2010), una alta relación a/c puede hacer que la pasta fluya demasiado y no encaje con los áridos, causando problemas de segregación. Por otro lado, una relación a/c baja produce pérdida de adhesión entre los áridos y también problemas durante la colocación, a causa de la falta de trabajabilidad de la mezcla en estado fresco.

La investigación ha mostrado que una relación a/c de entre 0,26 y 0,45 (ACI522; 2010) nos aporta una buena estabilidad de la pasta y un buen recubrimiento de los áridos en hormigón poroso. En la tabla 2.1 se puede observar algunas de las relaciones de a/c utilizadas por los investigadores en estudios sobre el hormigón poroso.

REFERENCIA	AÑO	RELACIÓN AGUA / CEMENTO
<i>ACI522</i>	2010	0,26 – 0,45
<i>Agar-Ozbek</i>	2013	0,3 – 0,35
<i>Aoki et al.</i>	2012	0,35
<i>Barnhouse et al.</i>	2016	0,46 – 0,48
<i>Bhutta et al.</i>	2012	0,27 – 0,35
<i>Chen et al.</i>	2013	0,28 – 0,34
<i>Cosic et al.</i>	2015	0,33
<i>Gesoğlu et al.</i>	2014	0,27
<i>Hesami et al.</i>	2014	0,27 – 0,4
<i>Huang et al.</i>	2010	0,3 – 0,35
<i>Ibrahim et al.</i>	2014	0,3 – 0,4
<i>Kim et al.</i>	2010	0,2
<i>Lian et al.</i>	2010	0,30 – 0,38
<i>Shu et al.</i>	2011	0,26 – 0,36
<i>Vázquez-Rivera et al.</i>	2015	0,34
<i>Yang et al.</i>	2003	0,2 – 0,35
<i>Zhong et al.</i>	2016	0,22 – 0,55

Tabla 2.1. Valores de agua/cemento para diferentes estudios;

Aunque la normativa americana marque el límite entre una relación a/c en 0,26 y 0,45, las investigaciones que se han realizado a posteriori, han conseguido delimitar más el rango óptimo de esta relación entre componentes del hormigón. La gran mayoría de los estudios posteriores a la redacción de la norma ACI522, muestran un rango que comprende los valores de a/c entre 0,27 y 0,40.

En la figura 2.3 se visualizan los resultados de la tabla 2.1 en forma de gráfica. Además, se utilizan unas líneas rojas para representar los límites establecidos por la normativa americana. Las líneas verdes muestran los límites que delimitan aún más el rango de valores de relación a/c que se consideran óptimos, según lo visto en investigaciones sobre el material. Se puede observar que la gran mayoría de las investigaciones trabajan dentro de estos rangos.

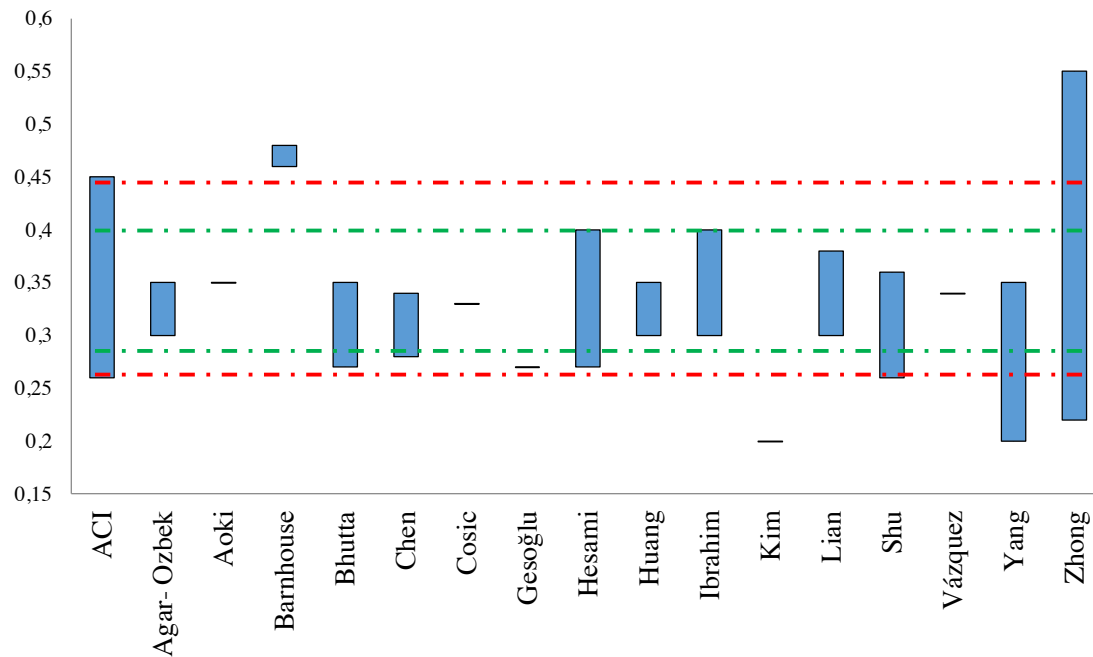


Figura 2.3. Relación agua/cemento: comparación de las investigaciones respecto a los límites establecidos por la ACI522 (2010);

2.2.2 AGREGADOS

Generalmente, los agregados se dividen en dos tipologías: áridos gruesos y áridos finos. Los agregados gruesos son los áridos que, mezclados con la pasta de cemento, formarán el hormigón poroso. Por otro lado, los áridos finos están limitados en hormigón poroso porque tienden a comprometer el sistema de interconectividad de los poros. La adición de árido fino puede incrementar la resistencia a compresión y la densidad pero a la vez reduce el ratio de permeabilidad de la masa de hormigón poroso (ACI522; 2010).

Los áridos gruesos son muy efectivos creando la estructura interna del hormigón poroso. Por ello, *Agar-Ozbek et al. (2013)* afirma que las propiedades del agregado grueso son el factor más determinante en las propiedades mecánicas del material. Las principales propiedades son tamaño, forma, tipología y resistencia. Según la investigación de *Cosic et al. (2015)*, la propiedad con mayor influencia sobre las propiedades mecánicas y reológicas del hormigón poroso es la tipología del árido.

El tamaño del árido es importante en el hormigón poroso porque es uno de los factores clave en la distribución de los poros. Si el tamaño de árido aumenta, también lo hace el tamaño de poros medio. La forma es determinante para el empaquetamiento y la unión de las partículas tras la compactación (*Marolf et al.; 2004*). De hecho, la uniformidad de la gradación de los áridos es necesaria para obtener permeabilidad. Si bien es cierto que tener dos tamaños de áridos puede aumentar las propiedades mecánicas, también disminuye la porosidad y la permeabilidad. Eso es debido a que los áridos de tamaño menor tenderán a ocupar los espacios formados entre los áridos de mayor tamaño. Por último, la humedad de los áridos es un factor a tener en cuenta para la mezcla de los materiales. Un exceso de humedad puede significar un exceso de la cantidad de agua en la mezcla y ese exceso puede hacer fluir demasiado la pasta y provocar segregación.

Varias son las normativas que regulan las propiedades del árido. Por ejemplo, la *UNE-EN 933-1* (1998) regula la determinación de la granulometría de las partículas a través del método del tamizado. El método del tamizado es un sistema de ensayo para la determinación del tamaño de los áridos. Consiste en pasar un conjunto de áridos por una serie de tamices, como los de la figura 2.4.a. para que el árido se divida según el tamaño de las partículas.

Otro ejemplo de normativa para estudiar los áridos es la *UNE-EN 933-3* (2004). Se trata de la regulación para la determinación de la forma de las partículas a través del índice de lajas. El índice de lajas es el porcentaje en peso de las partículas que son lajas, respecto una muestra de árido grueso. Se define como laja una partícula que tiene una dimensión mucho menor que las otras dos, es decir, una partícula plana. Estas partículas son perjudiciales para una mezcla de hormigón por su forma alargada. La figura 2.4.b muestra las principales tipologías de áridos según sus dimensiones.



Figura 2.4. Normativas para la determinación de las propiedades de los áridos; (a) tamices para la determinación de la granulometría del árido; (b) Morfología de los áridos atendiendo a sus dimensiones (adaptado de *ECLAP* (2016));

Varias pruebas han mostrado que la densidad aparente del agregado grueso puede ser usada efectivamente para dosificar el hormigón poroso (*ACI522*; 2010). La densidad aparente se define como la masa de muchas partículas de un material divididas por el volumen que estas partículas ocupan. El volumen total incluye el volumen de las partículas, el volumen de vacío entre las partículas y el volumen de poros internos. Las pruebas demuestran que el ratio del volumen aparente de árido grueso por volumen sólido del árido grueso puede ser usado como una relación para el diseño, donde:

- b/b_0 = volumen aparente de árido grueso en unidad de volumen de hormigón.
- b = volumen total del árido grueso.
- b_0 = volumen sólido del árido grueso.

El ensayo para determinar estos valores es el *ASTM C127-07* (2007). El valor de la relación b/b_0 compensa los efectos de las varias formas, calidades y pesos específicos de los áridos gruesos. Calcular la densidad aparente servirá para calcular la dosificación del hormigón poroso a través de un proceso que se especifica más adelante (Apartado 2.3).

2.2.3 ADICIONES

Para mejorar las propiedades y el comportamiento del hormigón poroso se puede substituir parte del cemento Portland por otro material cementante. Los más comunes son el humo de sílice (Agar-Ozbek *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2013; Lian *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2003; Zhong *et al.*, 2015) y las cenizas volantes (Aoki *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2003; Luck *et al.*, 2009; Vancura *et al.*, 2011; Vázquez-Rivera *et al.*, 2015).

El humo de sílice, también llamado microsílíce o sílice activa, es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura que se origina en la reducción del cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención de silicio metal y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco. El polvo se recoge en filtros de mangas, constando de partículas esféricas de SiO_2 amorfo en un porcentaje variable entre un 85% y un 98%. La normativa para la caracterización del humo de sílice en el hormigón es la UNE-EN 13263-1 (2009). La figura 2.5.b muestra la apariencia del humo de sílice.



Figura 2.5. Principales adiciones en el hormigón; (a) Apariencia de las cenizas volantes; (b) Apariencia del humo de sílice;

Como se ha podido comprobar en las investigaciones realizadas sobre estas adiciones, el humo de sílice no tiene buena respuesta en el hormigón poroso. Incluso disminuye la resistencia del material cuando el árido grueso es de mayor tamaño. Además, en los áridos gruesos de tamaño más pequeño aumenta las propiedades, aunque no de forma significativa (Agar-Ozbek *et al.*, 2013).

Este efecto negativo en las propiedades se debe a que el humo de sílice es un material fino, más fino que el cemento. Al combinarlo con los áridos gruesos, el efecto no es el deseado debido a la gran diferencia de tamaño. Para que el humo de sílice contribuya de forma positiva es muy importante añadir a la mezcla un aditivo reductor de agua (plastificante o superplastificante) (Chen *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2003).

Por otro lado, las cenizas volantes se definen, según la norma española UNE-EN 450-1 (2008), como un polvo fino con partículas principalmente esféricas y cristalinas. Las cenizas volantes son originadas por la combustión del carbón pulverizado. Tienen propiedades puzolánicas y están compuestas fundamentalmente de SiO_2 y Al_2O_3 . La figura 2.5.a muestra la apariencia de las cenizas volantes. Las cenizas volantes tampoco

contribuyen positivamente cuando entran en la mezcla sin ninguna adición que ayude a su funcionamiento como se puede ver en el estudio de *Aoki et al* (2012).

También se usan como adición: cenizas de cáscara de arroz (*Hesami et al.*, 2014), polímeros (*Huang et al.*, 2010; *Shu et al.*, 2011) y polvo de rueda reciclada (*Gesoğlu et al.*, 2014), entre otros.

2.2.4 ADITIVOS

Los aditivos son aquellas sustancias o productos que, incorporados a la mezcla de hormigón, producen la modificación deseada en el comportamiento del material o en sus propiedades. Su aplicación en la mezcla siempre será en una proporción no superior al 5% de la cantidad de cemento. La normativa que rige el uso y el control de los aditivos es la *UNE-EN 934-2* (2002).

La falta de trabajabilidad y la segregación son los principales motivos por los que se usan aditivos en las mezclas de hormigón poroso. Para la falta de trabajabilidad se usan aditivos reductores de agua, que coloquialmente se conocen como plastificantes y superplastificantes. La clave de estos aditivos es que consiguen mejorar la consistencia para un mismo contenido de agua.

Para evitar el problema de la segregación se utilizan aditivos cohesionantes. Los cohesionantes producen un incremento de la cohesión de la masa de mortero por la formación de un entramado químico, minimizando el riesgo de exudación y disgregación de la masa, sobretodo en hormigones de elevada fluidez y con deficiencia de finos, como es el caso del hormigón poroso.

También es habitual utilizar los retardadores de fraguado. Estos aditivos se emplean para retrasar el tiempo de fraguado del hormigón y obtener más tiempo para el manejo del hormigón en obra. Este tipo de aditivos son de mucha utilidad cuando los trabajos se tienen que realizar en climas calientes y/o cuando se espera que el transporte del hormigón tome mucho tiempo.

Otros aditivos que se emplean para mejorar las propiedades del hormigón poroso son: los aceleradores de fraguado, los aditivos de incorporación de aire y los aditivos de retraso de humedad, entre otros.

2.3 DOSIFICACIÓN

La dosificación es el proceso que establece las proporciones apropiadas de los materiales que componen el hormigón, a fin de obtener unas propiedades óptimas del material (consistencia, compacidad, resistencia, durabilidad, etc.). Como el hormigón poroso es un material heterogéneo, el proceso de dosificación debe ser más preciso que en el hormigón convencional. El objetivo de este punto es mostrar de qué manera se puede obtener una dosificación válida para un material tan rígido como el hormigón poroso.

El proceso para desarrollar las proporciones de la mezcla para el hormigón poroso es a menudo un ejercicio de prueba-error. El cálculo teórico de las proporciones con las cuáles hay que mezclar los componentes, no exime de la comprobación experimental para la puesta a punto de la composición a adoptar. Esto es debido a que ningún método de dosificación puede tener en cuenta la gran cantidad de factores que influyen en las propiedades del hormigón. La filosofía que se debe instaurar para tener éxito en la dosificación de las proporciones de la mezcla de hormigón poroso es la de conseguir el equilibrio entre huecos, resistencia, contenido de pasta y trabajabilidad.

En la Normativa *ACI 522* (2010) existe un procedimiento para realizar la dosificación del hormigón poroso. Pero para poder desarrollar dicho procedimiento es necesario saber cómo se determina el volumen de pasta, cemento y el contenido de agua. En este caso, la dosificación establece el mínimo volumen de pasta necesario para enlazar las partículas agregadas y conseguir que el material mantenga la estructura de vacíos necesaria, la resistencia y trabajabilidad.

Sabiendo el contenido de vacíos que se quiere obtener, gracias a una gráfica estandarizada que relaciona el contenido de vacíos con el volumen de pasta, se puede estimar el volumen de pasta necesario. Una vez el volumen de pasta está determinado, y la relación *a/c* seleccionada, la cantidad de cemento y agua puede ser determinada gracias a las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$V_p = \frac{c}{3,15 \times 1000 \text{ kg/m}^3} + \frac{w}{1000} \text{ kg/m}^3 \quad (2.1)$$

$$\text{Sustituyendo } w = (w/cm) \times c$$

$$V_p = c / (3,15 \times 1000 \text{ kg/m}^3) + [(w/cm) \times c / 1000 \text{ kg/m}^3] \quad (2.2)$$

La cantidad de cemento puede ser determinada gracias a la fórmula de la ecuación 2.3:

$$c = [V_p / (0,315 + w/cm)] \times 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (2.3)$$

Si se tiene la masa de cemento, el contenido de agua se puede calcular. Cuando se utiliza agregado fino, el volumen de pasta se debe reducir en un 2 % por cada 10% de agregado fino de la suma total para hormigón poroso bien compactado, y un 1% por cada 10 % de agregado fino del total del agregado para hormigón poroso ligeramente compactado. Estas reducciones son necesarias para mantener el mismo porcentaje de huecos en el mismo volumen.

Sabiendo cómo se determinan estos valores, ya se tienen los datos necesarios para abordar el procedimiento establecido por la *ACI 522* (2010) para la dosificación del hormigón poroso (método *b/b₀*). Este método para el diseño del hormigón poroso puede dividirse en ocho pasos, tal y como se muestra en la tabla 2.2.

MÉTODO b/b_0 (ACI 522)
1. Determinar peso de los áridos gruesos
2. Calcular el peso del árido saturado pero seco superficialmente (Para controlar la absorción del agua de la mezcla)
3. Determinar el volumen de pasta
4. Determinar el contenido de cemento
5. Determinar el contenido de agua
6. Calcular el volumen sólido
7. Comprobar contenido de vacíos
8. Grupo de pruebas iterativas; (a) pruebas para la caracterización del material; (b) Modificar las proporciones de la mezcla hasta obtener la dosificación esperada

Tabla 2.2. Método de prueba/error para la dosificación del hormigón poroso

Más recientemente, *Pieralisi* (2016) ha desarrollado un modelo teórico para ahorrar en el proceso de dosificación y fabricación del hormigón poroso. Su investigación ayudará a estandarizar los procesos en cada caso concreto de fabricación y, así, conseguir un ahorro tanto económico como de tiempo. En el capítulo 4 se muestra en profundidad el método ya que dicho método se ha utilizado en el presente trabajo para determinar la dosificación de los materiales y la compactación del hormigón.

2.4 PROPIEDADES

En este apartado se analizará el comportamiento de las principales propiedades del hormigón poroso. Además, también se profundizará sobre la influencia de la compactación y la repercusión de la cantidad de cemento en sus propiedades. El objetivo de este apartado es introducir todo el conocimiento necesario para entender los resultados de la campaña experimental que se llevó a cabo y que se detalla en el capítulo 4.

2.4.1 POROSIDAD

En el hormigón poroso, el tamaño de los poros y su estructura son dos factores básicos que influyen todas las propiedades y el desempeño característico del material. Para generar poros más grandes en el material, se recomiendan los áridos gruesos de mayor tamaño ya que pueden reducir las opciones de obstrucción de los poros. Por otro lado, el contenido de vacío es dependiente de varios factores: la dosificación de los áridos, el contenido de material cementoso, la relación a/c y el esfuerzo de compactación. *Low et al.* (2008) describió en términos generales un enfoque estadístico para la determinación de los factores que influyen en las características de la estructura de poros como el factor de conectividad de poros, la porosidad y el desempeño característico (permeabilidad) del hormigón poroso.

Determinar la porosidad del hormigón poroso endurecido se puede hacer, básicamente, a través de 3 métodos: El primero es un procedimiento volumétrico donde la masa de agua que traspasa una muestra sellada de hormigón poroso se convierte en un volumen de poros equivalente (*ASTM C1754/C1754M-12*; 2012). El segundo es un procedimiento a través de análisis de imagen. Se emplea en especímenes de hormigón

poroso que han sido impregnados con un epoxy de baja viscosidad. El análisis de imágenes es ventajoso en el caso de determinar la variación de la porosidad con la profundidad de especímenes o capas de hormigón poroso. Y por último, se puede usar la normativa de porosidad efectiva en mezclas bituminosas (*ASTM D7063/ D7063M-11*; 2011).

La tabla 2.3 muestra los rangos de porosidad alcanzados en las investigaciones anteriores. Esta tabla muestra la importancia de la inclusión de árido fino, aditivos y adiciones en la mezcla. Tienen una gran influencia sobre el resultado de porosidad esperado. Sin embargo, algunos estudios que no usan ningún tipo de material extra, son capaces de obtener valores de porosidad parecidos a los que añaden estos materiales en la mezcla. Esto puede estar relacionado con un eficiente procedimiento de compactación y a una buena dosificación de los materiales básicos. Por lo tanto, para la porosidad del hormigón poroso no es tan importante la adición de materiales extras como una buena dosificación de los materiales básicos o una correcta compactación de los mismos.

REFERENCIA	AÑO	POROSIDAD (%)	EXTRAS
<i>ACI522</i>	2010	15 – 35	-
<i>Agar-Ozbek et al.</i>	2013	18 – 27	(2)(3)
<i>Ahmed et al.</i>	2014	30 – 42	-
<i>Aoki et al.</i>	2012	31 – 37	(1)(2)
<i>Barnhouse et al.</i>	2016	33 – 40	(1)(3)
<i>Bhutta et al.</i>	2012	18 – 28	(3)
<i>Chen et al.</i>	2013	15 – 25	(2)(3)(4)
<i>Cosic et al.</i>	2015	14 – 22	-
<i>Hesami et al.</i>	2014	9 – 29	(2)(5)
<i>Huang et al.</i>	2010	21 – 30	(1)(5)(6)
<i>Kim et al.</i>	2010	19,5 – 38	(3)
<i>Lian et al.</i>	2010	7,5 – 16	(1)(2)(3)
<i>Shu et al.</i>	2011	19 – 26	(1)(3)(6)
<i>Tho-in et al.</i>	2012	29 – 32	(2)(3)
<i>Vázquez-Rivera et al.</i>	2015	5,5 – 17,5	(2)
<i>Zhong et al.</i>	2016	17 – 33	(2)(3)

Tabla 2.3. Rangos de porosidades según investigadores; EXTRAS: (1) Áridos Finos; (2) Adiciones; (3) Aditivos; (4) Polímeros; (5) Fibras; (6) Látex;

Entre la poca investigación existente sobre la influencia de la compactación en las propiedades del hormigón, destaca un trabajo del año 1995 realizado por *Ghafoori*. Este investigador analizó la influencia de la energía de compactación a lo largo del proceso de compactar el hormigón en estado fresco. *Ghafoori* analizó la influencia de dicho factor sobre las propiedades del material.

Es importante destacar que la energía de compactación en el hormigón poroso varía considerablemente los valores de porosidad. La figura 2.6 muestra los resultados del contenido de aire (en porcentaje) en función de la energía de compactación. Los resultados están divididos según la relación árido/pasta de cemento de la mezcla. *Ghafoori* (1995) determinó que la porosidad disminuye en relación al aumento de la energía de compactación. Los resultados de la figura 2.6 muestran una disminución del valor de contenido de aire.

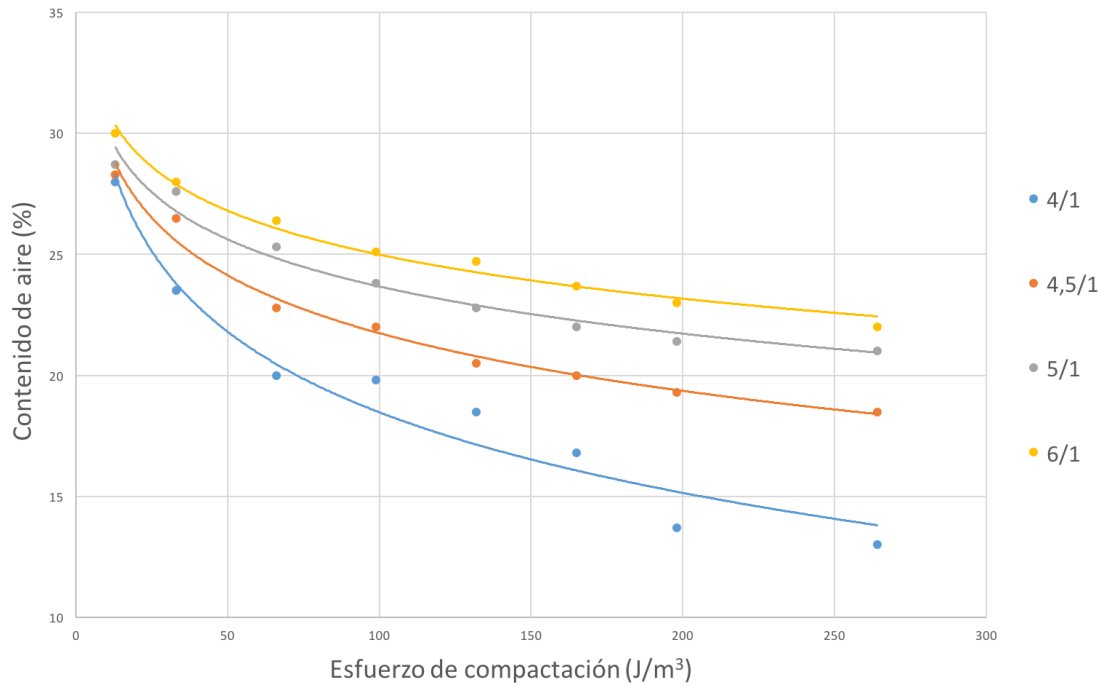


Figura 2.6. Influencia de la energía de compactación y de la cantidad de cemento en el contenido de aire (adaptado de *Ghafoori* (1995));

Como se puede ver en la figura 2.6, la disminución de la porosidad en función de la compactación, se acentúa cuanto menor sea la cantidad de cemento (véase que la figura 2.6 está estudiando el contenido de aire en la mezcla). Sin embargo, el comportamiento esperado por la porosidad es similar al del contenido de vacío. Además, los resultados de la figura 2.6 muestran que tras alcanzar la compactación máxima, la cantidad de aire en la mezcla puede disminuir un 50% aproximadamente.

2.4.2 DENSIDAD

Para un contenido de pasta constante, el contenido de vacío es función del esfuerzo de compactación, la textura y forma de los áridos y el coeficiente de uniformidad del árido. Si el contenido de vacíos es función de estos condicionantes, la densidad también lo será. Consecuentemente, a menor cantidad de vacíos, mayor será la densidad del material.

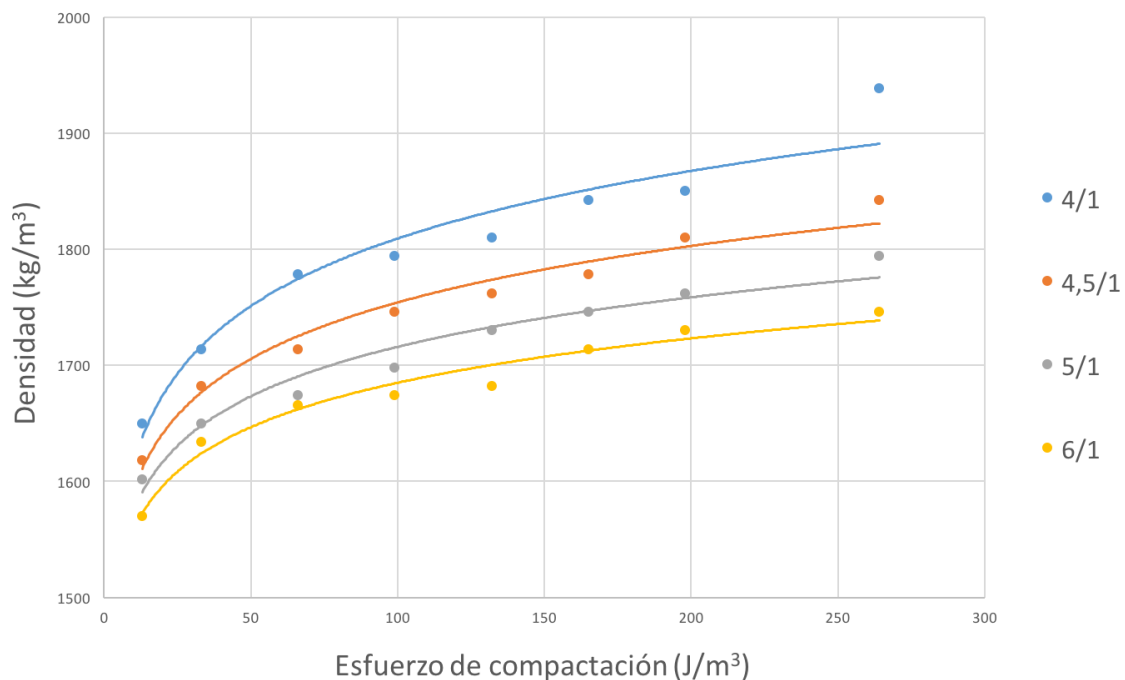
En la tabla 2.4 se muestran los rangos de densidad que han utilizado los investigadores para trabajar el hormigón poroso. Además, la tabla 2.4 contiene los valores de porosidad para poder analizar la relación entre ambas propiedades.

Las densidades de los resultados varían entre 1190 kg/m³ y 2435 kg/m³. El rango de densidades en hormigón poroso es muy amplio debido al alto contenido de vacíos en la mezcla. Respecto a la relación con la porosidad, el valor de densidad está influenciado por esta propiedad. Las investigaciones con resultados de porosidad bajos han obtenido valores de densidad altos.

REFERENCIA	AÑO	POROSIDAD (%)	DENSIDAD (kg/m ³)
Ahmed et al.	2014	30 – 42	1650 – 1875
Aoki et al.	2012	31 – 37	1750 – 1830
Cosic et al.	2015	14 – 22	2075 – 2435
Kim et al.	2010	19,5 – 38	1190 – 1830
Lian et al.	2010	7,5 – 16	2010 – 2265
Tho-in et al.	2012	29 – 32	1740 – 1820
Vázquez-Rivera et al.	2015	5,5 – 17,5	2120 – 2360

Tabla 2.4. Valores de densidad de estudios de hormigón poroso comparados con la porosidad;

El esfuerzo de compactación y la relación agregado/ pasta de cemento tienen influencia en la densidad de una mezcla de hormigón poroso. Según *Ghafoori* (1995), el resultado de estudiar la densidad variando el esfuerzo de compactación y la cantidad de cemento es el que se muestra en la figura 2.6. Como se puede ver, el aumento de la densidad se debe al aumento del esfuerzo de compactación y al aumento de la cantidad de cemento. Además, el crecimiento de la densidad es mayor al inicio de la compactación. Luego, con valores más grandes de compactación, el crecimiento es más ligero. Por último, también se puede observar que a mayor cantidad de cemento, y con el mismo esfuerzo de compactación, la diferencia entre valores de densidad es mayor.


 Figura 2.7. Influencia de la energía de compactación y de la cantidad de cemento en la densidad [adaptado de *Ghafoori* (1995)];

2.4.3 PERMEABILIDAD

Para determinar la permeabilidad de un material, el coeficiente de permeabilidad debe ser determinado como la cantidad de fluido que traspasa una unidad de área por una unidad de tiempo dividido por una unidad de gradiente hidráulico (*Hesami et al.*; 2014).

El ratio de filtración del hormigón poroso está directamente relacionado con la porosidad y el tamaño de poros (son el factor determinante). Tras el proceso de compactación, una porosidad mínima del 15% es requerida para una buena filtración. Además, a parte de la porosidad y del tamaño de poros, un factor crucial que influencia la permeabilidad del hormigón poroso es la tortuosidad o el grado de conectividad de la red de poros. No hay ningún procedimiento sencillo en la actualidad para medir la conectividad de poros del hormigón poroso.

Aunque la estandarización de los ensayos de permeabilidad no es la óptima y se deben encontrar procesos para determinarla con precisión, la permeabilidad del hormigón poroso puede ser medida por dos métodos diferentes: Permeámetro de Carga Variable y Permeámetro de Carga Constante. Ambos ensayos usan el mismo equipamiento aunque la metodología para medir la permeabilidad es diferente.

Para estos ensayos se usa un tubo superior, un recubrimiento impermeable del espécimen, para evitar la pérdida lateral de agua, y un tubo inferior, como se muestra en la figura 2.8.a. Aunque la estructura general de ambos ensayos es parecida, el funcionamiento para la realización del ensayo es considerablemente distinta. A continuación se muestra el funcionamiento de ambos métodos.

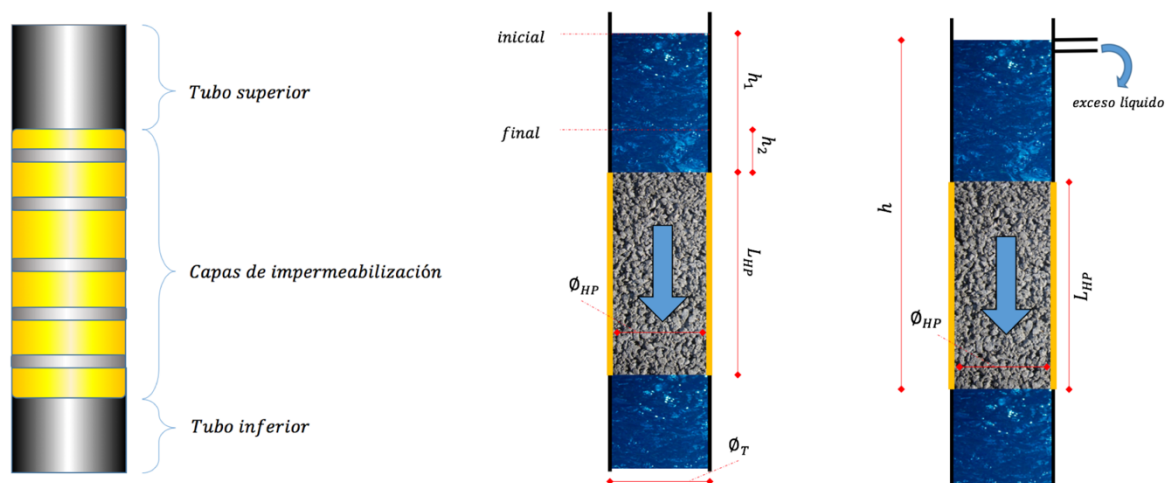


Figura 2.8. Ensayo de permeabilidad en hormigón poroso; (a) Estructura general de ambos ensayos (b) Funcionamiento del ensayo de Permeámetro Variable; (c) Funcionamiento del ensayo de Permeámetro Constante;

El ensayo de Permeámetro de Carga Variable es el más usado en las investigaciones (*Lian et al.*, 2010; *Chen et al.*, 2013; *Yang et al.*, 2003) y está en la normativa ACI 522 (2010). La figura 2.8.b muestra el esquema de funcionamiento del ensayo. Los pasos a seguir para medir la permeabilidad son (*Pieralisi*; 2016):

- 1) La base inferior debe estar cerrada;
- 2) A continuación, se llena de agua la estructura hasta el nivel inicial (h_1);
- 3) Se abre el tubo inferior y dejamos caer el agua;
- 4) Finalmente, se mide el tiempo que tarda el agua en alcanzar el nivel final (h_2);

Con los datos obtenidos, la permeabilidad 'K' se estima con la ecuación 2.4:

$$K = \frac{\phi_t^2 \cdot L_s}{\phi_{hp}^2 \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (2.4)$$

En esta ecuación, ϕ_t es el diámetro interior del tubo, ϕ_{hp} es el diámetro del espécimen del hormigón poroso, h_1 es la distancia entre la parte superior del espécimen y el nivel inicial de agua y h_2 es la distancia entre la parte superior del espécimen y el nivel final de agua.

El ensayo de Permeámetro de Carga Constante empieza a ganar fuerza en los estudios de permeabilidad de hormigones porosos (Zhong *et al.*, 2015; Ahmed *et al.*, 2014; Thoin *et al.*, 2012). La figura 2.8.c. muestra el esquema de funcionamiento del ensayo. Los pasos a seguir para medir la permeabilidad son (Pieralisi; 2016):

- 1) La base inferior debe estar cerrada;
- 2) A continuación, se mide el volumen de agua necesaria para llenar el tubo inferior y el espécimen;
- 3) Luego el aparato se llena de agua hasta alcanzar el nivel de agua máximo y se abre el tubo inferior. El exceso de agua saldrá por el pequeño tubo superior;
- 4) Finalmente, se mide el volumen de agua que pasa a través del espécimen en un intervalo de tiempo.

Con los datos obtenidos, la permeabilidad 'K' se estima con la ecuación 2.5:

$$K = \frac{4 \cdot q \cdot L_s}{\pi \cdot \phi_{hp}^2 \cdot h \cdot t} \quad (2.5)$$

En esta ecuación, ϕ_{hp} es el diámetro del espécimen del hormigón poroso, q es la diferencia entre la dos medidas de volumen de agua ($q_2 - q_1$), h es la distancia entre la parte superior del espécimen y el nivel de agua y t es el intervalo de tiempo.

Para ver en más profundidad las diferencias entre el método de permeámetro de carga variable y el método de permeámetro de carga constante, se analizarán los resultados de permeabilidad en investigaciones anteriores a la realización de este trabajo. En la tabla 2.5 aparecen dichos resultados.

Aunque se ha intentado aportar el mismo número de investigaciones para cada método, es innegable que el ensayo más extendido hasta la fecha es el permeámetro de carga variable. A pesar de esto, sí que es cierto que el permeámetro de carga constante poco a poco empieza a ganar terreno y los investigadores empiezan a apostar por su uso en los ensayos de permeabilidad de hormigones porosos.

Si se razona mínimamente cuál es la opción más adecuada para evaluar los materiales porosos, rápidamente se llega a la conclusión de que el ensayo de carga constante es una mejor alternativa. El permeámetro de carga variable es un ensayo que dura poco tiempo porque el tránsito de agua a través de un material poroso es rápido y, por lo tanto, cuando el tiempo de ensayo se reduce, aumentan las probabilidades de cometer errores humanos en las mediciones. Contrariamente, en el caso del permeámetro de carga constante, el investigador decide cuánto tiempo dura el ensayo. Esto provoca que los errores por fallos humanos se reduzcan.

En definitiva, el permeámetro de carga variable es un buen método para ensayar un hormigón convencional ya que su flujo de agua es mínimo. En cambio, el permeámetro de carga constante es un buen método para materiales porosos por los cuales el flujo de agua es muy superior.

También se debe tener en cuenta a la hora de escoger qué método se va a llevar a cabo, la duración y la dificultad del ensayo. Aunque con el permeámetro de carga constante es un poco más dificultoso, para calcular permeabilidades en hormigones porosos vale la pena el esfuerzo con tal de obtener unos resultados más precisos.

MÉTODO	REFERENCIA	AÑO	PERMEABILIDAD (mm/s)	EXTRAS
Permeámetro Carga Variable	<i>Gesoğlu et al.</i>	2014	1,5 – 3,5	(7)
	<i>Hesami et al.</i>	2014	1 – 5	(2)(5)
	<i>Lian et al.</i>	2010	8,5 – 27,5	-
	<i>Lian et al.</i>	2010	4 – 12,5	(1)(2)(3)
	<i>Lian et al.</i>	2010	1 – 8,5	(1)(2)(3)
	<i>Yang et al.</i>	2003	8 – 9	(1)
	<i>Yang et al.</i>	2003	1,5 – 2	(1)(2)(3)
	<i>Yang et al.</i>	2003	0,5 – 2,5	(1)(2)(3)(4)
	<i>Huang et al.</i>	2010	17 – 19	-
	<i>Huang et al.</i>	2010	12,5 – 16	(6)
	<i>Huang et al.</i>	2010	13 – 15	(1)(6)
	<i>Huang et al.</i>	2010	12 – 15	(1)(5)(6)
Permeámetro Carga Constante	<i>Shu et al.</i>	2011	1,5 – 2	(1)(3)(6)
	<i>Zhong et al.</i>	2015	5 – 60	-
	<i>Zhong et al.</i>	2015	5 – 50	(2)(3)
	<i>Vázquez et al.</i>	2015	5 – 17,5	(2)
	<i>Ahmed et al.</i>	2014	15 – 28	-
	<i>Tho et al.</i>	2012	19 – 60	(2)(3)
	<i>Aoki et al.</i>	2012	9 – 17	(1)(2)

Tabla 2.5. Ensayo de permeabilidad en diferentes estudios; EXTRAS: (1) Áridos Finos; (2) Adiciones; (3) Aditivos; (4) Polímeros; (5) Fibras; (6) Látex; (7) Caucho;

Si se analizan los resultados de la tabla 2.5, los valores del ensayo de carga variable distan de los resultados del ensayo de carga constante. En líneas generales, los

resultados del permeámetro de carga constante son más elevados que los del permeámetro de carga variable. Además, son rangos de valores mucho más amplios.

Analizando la influencia de los materiales extras en la permeabilidad del material, se puede llegar a la conclusión que la adición de materiales para mejorar las características del hormigón afecta más a sus valores de permeabilidad que a los valores de porosidad. Por ejemplo, en el estudio de *Lian et al.* (2010) se diseñaron varias tipologías de probetas. Desde probetas sólo con los materiales básicos hasta probetas con árido fino, adiciones y aditivos. Mientras la porosidad varía entre 7,5% y 16%, el valor de la permeabilidad de las mismas probetas va desde 1 mm/s hasta 27,5 mm/s. Observando la tabla vemos que los valores de permeabilidad caen drásticamente al añadir los materiales extras, como en el caso del estudio de *Yang et al.* (2003).

Tras ver las generalidades de la permeabilidad, hay que analizar también la influencia de las variables del estudio en la misma. Tanto la compactación como la cantidad de cemento son efectos clave en el comportamiento de la permeabilidad en el hormigón poroso. Según *Ghafoori* (1995), el incremento en la energía de compactación fuerza al árido a empaquetar la mezcla. Este efecto provoca una disminución de la permeabilidad. Además, una disminución del ratio agregado/cemento (aumento de la cantidad de cemento) reduce el número y el tamaño de los huecos, disminuyendo también la permeabilidad.

La figura 2.9 muestra el comportamiento a permeabilidad de unas muestras de hormigón poroso con energía de compactación y cantidad de cemento variable. Si se compara el comportamiento de la permeabilidad respecto a la compactación con el comportamiento respecto a la porosidad, se observa que ambas tienen el mismo recorrido por las diferentes escalas de compactación. Sin embargo, mientras la porosidad se llegaba a reducir un máximo del 50%, en el caso de la permeabilidad, esta reducción llegaba a ser de 10 veces el valor inicial.

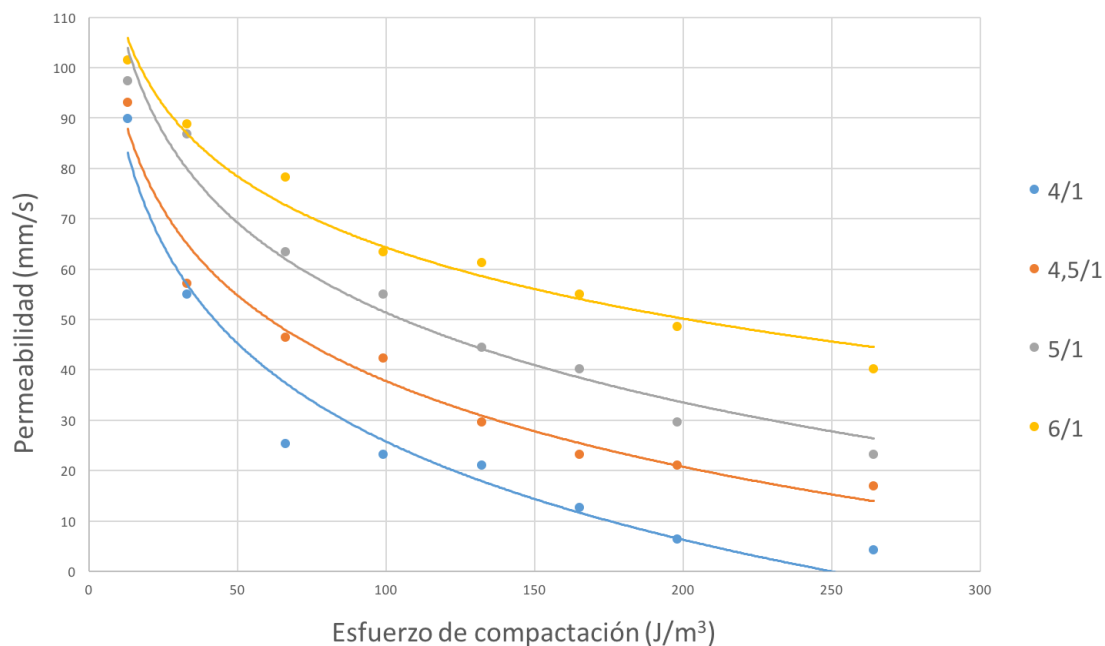


Figura 2.9. Influencia de la energía de compactación y de la cantidad de cemento en la permeabilidad [adaptado de *Ghafoori* (1995)];

2.4.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La resistencia a compresión del hormigón poroso está estrechamente relacionada y afectada por las proporciones de la mezcla y el esfuerzo de compactación durante la colocación. Ha sido estudiado que un aumento del tamaño de árido reduce la resistencia a compresión mientras que los aditivos y adiciones aumentan la resistencia a compresión para una misma dosificación.

Además, un aumento del módulo de finura de los áridos reduce la resistencia a compresión y una alta relación de agua/cemento puede hacer que la pasta fluya demasiado y no encaje con los áridos. Y por otro lado, una relación agua/cemento baja produce pérdida de adhesión entre los áridos y también problemas durante la colocación. Así pues, la relación de agua/cemento es muy importante para tener unas condiciones óptimas de estructura de vacío y de resistencia a compresión.

Respecto a la cantidad de cemento, un exceso puede dar una estructura de vacío demasiado llena y, consecuentemente, una reducción de porosidad. A pesar de esto, respecto a la resistencia a compresión, esto hace que aumente. En cuanto a la falta de contenido de cemento, esto puede resultar en una falta de recubrimiento creado por la pasta y reducir así la resistencia a compresión. El contenido óptimo está estrechamente relacionado con la dosificación y el tamaño del árido. Sin embargo, el factor clave para obtener valores destacados de resistencia a compresión vuelve a ser la compactación. Aunque se añadan varios materiales extra para potenciar las propiedades y se ajuste idóneamente, sin una buena compactación no se obtienen los resultados esperados.

En la tabla 2.6 se muestran algunos resultados destacados sobre la resistencia a compresión. Se observa que los materiales extras no son tan importantes en esta propiedad del hormigón poroso. Por ejemplo, un hormigón poroso sin extras como el de *Cosic et al.* (2015) es capaz de alcanzar valores de 27 MPa mientras que un hormigón con árido fino y adiciones como el de *Aoki et al.* (2012) alcanza los 10 MPa.

REFERENCIA	AÑO	POROSIDAD (%)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	EXTRAS
<i>Agar-Ozbek et al.</i>	2013	18 – 27	24,5 – 50,5	(2)(3)
<i>Ahmed et al.</i>	2014	30 – 42	1 – 7	-
<i>Aoki et al.</i>	2012	31 – 37	5,5 – 10	(1)(2)
<i>Barnhouse et al.</i>	2016	33 – 40	34 – 36	(1)
<i>Bhutta et al.</i>	2012	18 – 28	10 – 25	(3)
<i>Chen et al.</i>	2013	15 – 25	32 – 47	(2)(3)(4)
<i>Cosic et al.</i>	2015	14 – 22	20 – 27	-
<i>Gesoglu et al.</i>	2014	-	6,5 – 21,5	(7)
<i>Hesami et al.</i>	2014	9 – 29	13 – 22	(2)(5)
<i>Huang et al.</i>	2010	21 – 30	5 – 13	(1)(5)(6)
<i>Kim et al.</i>	2010	19,5 – 38	1,5 – 15	(3)
<i>Lian et al.</i>	2010	7,5 – 16	12 – 40	(1)(2)(3)
<i>Shu et al.</i>	2011	19 – 26	22 – 30	(1)(3)(6)
<i>Tho-in et al.</i>	2012	29 – 32	5,5 – 11,5	(2)(3)
<i>Vázquez et al.</i>	2015	5,5 – 17,5	2,5 – 13,5	(2)
<i>Yang et al.</i>	2003	-	7 – 57	(1)(2)(3)
<i>Zhong et al.</i>	2015	17 – 33	7,5 – 66	(2)(3)

Tabla 2.6. Ensayo de resistencia a compresión en diferentes estudios; EXTRAS: (1) Áridos Finos; (2) Adiciones; (3) Aditivos; (4) Polímeros; (5) Fibras; (6) Látex; (7) Caucho;

Gracias a la incorporación de la porosidad en la tabla, se puede analizar su influencia en la resistencia a compresión. Aunque sigue existiendo una influencia clara de la porosidad, la importancia de ésta es inferior en el caso de la resistencia a la compresión que en el caso de la densidad. En la determinación de la resistencia a compresión otros factores (como los materiales extra) ganan influencia.

En el estudio de *Ghafoori* (1995) se evaluó la influencia del esfuerzo de compactación y de la cantidad de cemento en el hormigón poroso. Son dos factores cruciales en el comportamiento del hormigón poroso. Si se aumenta el esfuerzo de compactación y se reduce el ratio agregado/cemento (subiendo la cantidad de cemento), la resistencia a compresión aumenta. Como se puede observar en la figura 2.10, las diferencias en la resistencia a compresión de varios ratios agregado/cemento incrementan a la vez que aumenta el esfuerzo de compactación.

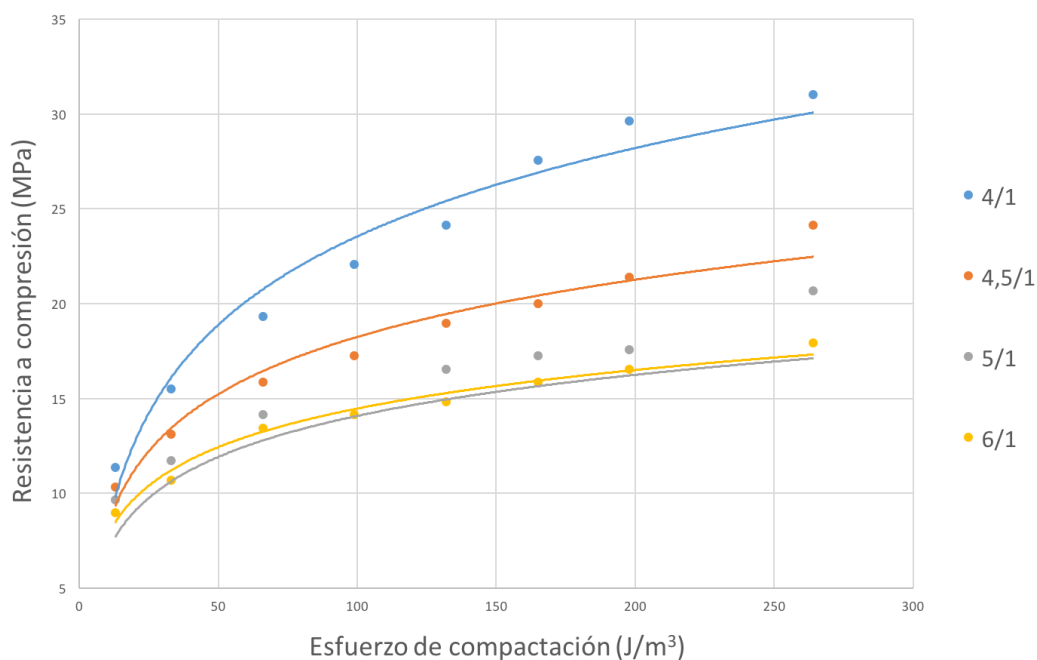


Figura 2.10. Influencia de la energía de compactación y de la cantidad de cemento en la resistencia a compresión [adaptado de *Ghafoori* (1995)];

2.5 APLICACIONES

En este punto se muestran los principales usos del hormigón poroso con el objetivo de descubrir sus utilidades. El hormigón poroso empezó a tenerse en cuenta para usos constructivos en los años 60, porque se descubrió que la escorrentía de los servicios de mantenimiento existentes contaminaban los suministros de agua superficial y subterránea. Por eso, desde entonces, esa ha sido una preocupación en el desarrollo de sistemas de control del agua. El hormigón poroso reduce el impacto de la urbanización minimizando o eliminando las tasas de escorrentía de aguas pluviales y protegiendo así los suministros de agua.

Con el avance en la investigación del material, el hormigón poroso es usado con mayor frecuencia y sus aplicaciones aumentan con el paso del tiempo. Su aplicación principal, por su elevada permeabilidad y filtración de agua, es como pavimento y/o suelo. Su gran capacidad de filtración evita uno de los grandes contratiempos de los pavimentos de asfalto o hormigón convencional: la ineficaz respuesta de estos pavimentos impermeables ante el drenaje de agua, lo que provoca problemas de escorrentía y de seguridad.

Las principales aplicaciones en pavimentos son (ACI 522 (2010)):

- Pavimento para estacionamiento de vehículos (véase figura 2.11.a).
- Suelos en zoológicos, piscinas, parques y pistas de tenis (figura 2.11.b), entre otros.
- Firmes para calles, carreteras, calzadas y aeropuertos (véase figura 2.11.c).



Figura 2.10. Aplicaciones del hormigón poroso; (a) Estacionamiento de vehículos; (b) Pista de tenis; (c) Firme para viandantes;

Sin embargo, en todas estas aplicaciones, el hormigón convencional sigue siendo el material más utilizado. Por ello, este estudio quiere dar argumentos para sostener que el hormigón poroso debe seguir creciendo y mejorando para imponerse sobre el hormigón convencional. Se tienen que identificar los puntos fuertes y los puntos débiles respecto al hormigón convencional y una vez definidos los pros y los contras, fijar las mejoras para subir las prestaciones del material. Por ejemplo, si se sabe que la resistencia es un punto débil del hormigón poroso, la clave es centrar la investigación en ese aspecto.

Las principales ventajas de los pavimentos de hormigón poroso frente a los de hormigón convencional son:

- Control de la contaminación de agua pluviales.
- Eliminación de zonas de retención de aguas debido al aumento de la filtración.
- Control de la escorrentía de agua pluviales.

- Reducción del efecto de “aquaplaning”.
- Refrigeración del pavimento más rápida.
- Reducción del deslumbramiento en la superficie de los pavimentos.
- Reducción del ruido por la interacción rueda-pavimento.
- Eliminación o reducción de las alcantarillas pluviales.
- Permitir al aire y al agua llegar a las raíces de los árboles.

Y, por otro lado, sus principales desventajas son:

- Menor resistencia. Uso limitado en áreas de tráfico de vehículos pesados.
- Necesidad de una mayor especialización para su construcción y puesta en obra.
- Tiempo de curado más extenso.
- Mayor atención y cuidado en el diseño. Falta de normativa estandarizada.

Este estudio se centra en el uso del hormigón poroso como pavimento, pero ésta no es la única aplicación del hormigón poroso. También se puede usar en construcción (aunque no es su ámbito principal), como sistema de drenaje o incluso como barrera acústica. En los últimos años, también se ha descubierto que el hormigón poroso puede ser un buen aislante térmico y que además se ha usado el hormigón poroso como protector de vegetación en fondos marinos.

3. METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

Tras ver la información desarrollada por los investigadores a lo largo de los últimos años, en el presente capítulo se muestra en profundidad la metodología y los procesos utilizados para los objetivos del estudio. En este capítulo se detallarán todas las premisas y normas seguidas para la fabricación y el desarrollo del ensayo de las probetas de hormigón poroso. Éstas son la base de la campaña experimental de este trabajo. Así pues, el objetivo del capítulo es explicar todos los procedimientos seguidos para que el lector pueda entender los resultados del trabajo.

Como indica la figura 3.1, el capítulo está estructurado según el orden cronológico seguido para la producción de las probetas y los ensayos. El primer paso es definir las variables del estudio y los materiales que forman las probetas. A continuación, se establecen los procesos para la obtención de las mismas. Dichos procesos son: dosificación, fabricación, compactación y almacenamiento. Finalmente, se concluirá con los ensayos para la determinación de las propiedades del hormigón poroso.

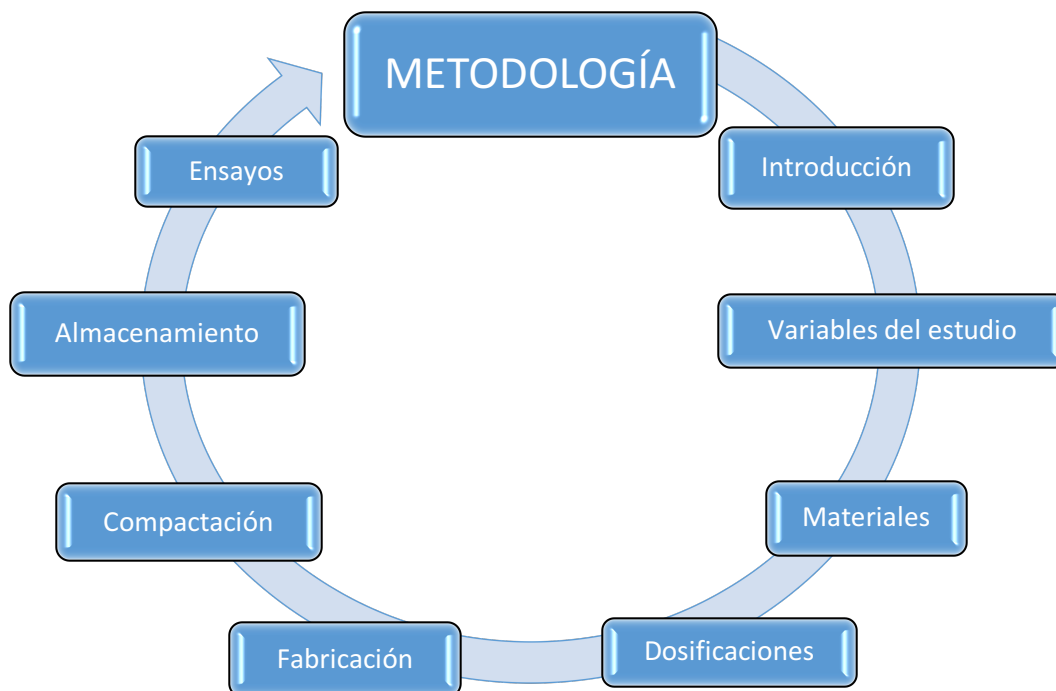


Figura 3.1. Organización del apartado número 3: Metodología

3.2 VARIABLES DEL ESTUDIO

Como ya se ha comentado con anterioridad, las variables utilizadas en esta investigación fueron: la cantidad de cemento contenida en la mezcla y el tanto por ciento de compactación que se aplica a la probeta una vez es fabricada. Jugando con estas dos variables se obtuvieron varias combinaciones que sirvieron para poder analizar la influencia de las mismas en las propiedades del hormigón poroso.

Para la cantidad de cemento se usaron cuatro valores diferentes: comprendidos entre 300 y 450 kg/m^3 cambiando cada 50 kg/m^3 . Para la compactación, se trabajó a partir de valores de tanto por ciento de compactación respecto a la longitud inicial de los especímenes y los tres valores fueron: 10%, 15% y compactación máxima (próxima al 20%). Para diferenciar los diferentes grupos de probetas, se le asignó una nomenclatura especial a cada tipología, como se muestra en la tabla 3.1. Para cada nomenclatura se fabricaron 10 probetas. Así pues, la campaña experimental constó de 120 probetas.

CEMENTO (kg/m^3)	COMPACTACIÓN (%)	NOMENCLATURA
300	10	300-10
	15	300-15
	20	300-20
350	10	350-10
	15	350-15
	20	350-20
400	10	400-10
	15	400-15
	20	400-20
450	10	450-10
	15	450-15
	20	450-20

Tabla 3.1. Nomenclaturas de los diferentes hormigones porosos fabricados;

3.3 MATERIALES

La composición básica de un hormigón poroso contiene cemento, agua y árido grueso. En esta campaña experimental se ha buscado reducir al máximo las variables. El objetivo es centrar los esfuerzos en el grado de compactación y la dosificación de materiales. Aunque se intentó no utilizar ningún aditivo ni adición en la mezcla, finalmente se optó por usar retardador de fraguado para evitar problemas durante el proceso de colocación del hormigón en las probetas y en la compactación.

En resumen, las probetas del estudio fueron producidas a partir de:

- Cemento Portland CEM II / A-L 42,5R.
- Agua.
- Árido calizo, de tamaño entre 5 y 12 mm.
- Retardador de fraguado.

3.4 DOSIFICACIONES

Las cuatro tipologías de dosificación existentes en el trabajo se muestran en la tabla 3.3. La cantidad de cemento es la variable que vamos a modificar. Como la cantidad de agua depende de la cantidad de cemento, también varía en cada dosificación. Lo mismo pasa con el retardante de fraguado.

NOM.	ÁRIDO (kg/m ³)	CEMENTO (kg/m ³)	RELACIÓN A/P	RELACIÓN A/C	RETARDANTE (kg/m ³)
300-10	1400	300	3,67	0,27	3,0
300-15	1400	300	3,67	0,27	3,0
300-20	1400	300	3,67	0,27	3,0
350-10	1400	350	3,15	0,27	3,5
350-15	1400	350	3,15	0,27	3,5
350-20	1400	350	3,15	0,27	3,5
400-10	1400	400	2,76	0,27	4,0
400-15	1400	400	2,76	0,27	4,0
400-20	1400	400	2,76	0,27	4,0
450-10	1400	450	2,45	0,27	4,5
450-15	1400	450	2,45	0,27	4,5
450-20	1400	450	2,45	0,27	4,5

Tabla 3.2. Dosificaciones del hormigón poroso

3.5 FABRICACIÓN

El primer paso fue pesar todos los materiales. Tanto para el agua, como el retardador y como el cemento, el proceso de pesaje fue inmediato. En cambio, para el árido grueso se necesitó un proceso previo al pesaje: el tamizado. Se usó un tamiz de 2 mm. El objetivo del tamizado es separar el árido grueso de los restos de fracción fina.

Tras el pesaje, la preparación de las probetas se realizó antes de producir la mezcla de los materiales. Por un lado, fue necesario limpiar las probetas para evitar restos de fabricaciones anteriores. Por otro lado, se aplicó a las probetas una capa de aceite en las paredes interiores. Esta capa de aceite sirve para facilitar la separación de la muestra una vez ha endurecido. Cuando todo estuvo listo, se pudo proceder a la mezcla de los materiales componentes del hormigón poroso.

La máquina usada para la mezcla fue una mezcladora de mortero “tipo 65/2 K-3” con capazo de 65 l de capacidad. La figura 3.2.a muestra una mezcladora de mortero como la usada en la presente campaña experimental. La máquina tiene una velocidad de giro de 40 rpm. Las palas de mezcla giran a 150 rpm. Se inició la mezcla colocando el árido grueso y el cemento en el capazo y se dejó que ambos materiales se mezclaran durante sesenta segundos. Seguidamente, se añadió el 70% de la cantidad de agua se añadió a la mezcla y se dejó trabajando otros treinta segundos. Para concluir, se mezclaron el resto de agua y el retardador en un recipiente a parte y se incorporaron a la mezcla. El producto final se dejó mezclando durante sesenta segundos más.

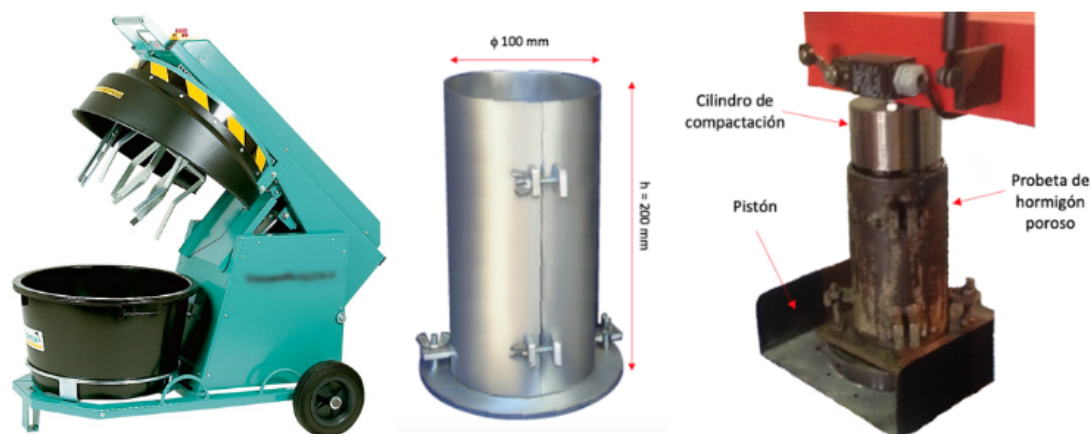


Figura 3.2. Procesos de fabricación, compactación y almacenamiento; (a) Máquina mezcladora de mortero 65/2 K-3; (b) Dimensiones de los moldes; (c) Estructura de la máquina compactadora;

3.6 COMPACTACIÓN

Tras la mezcla, el retardante de fraguado ayudó a mantener el estado fresco y la trabajabilidad del hormigón poroso durante el proceso de compactación. Sin embargo, es importante actuar lo más rápido posible en el transcurso de este proceso ya que antes de la compactación hay que realizar el llenado de los moldes.

Los moldes y las dimensiones de los mismos se muestran en la figura 3.2.b. La forma, dimensiones y tolerancias de las probetas y los moldes requeridos para fabricarlas cumplen las especificaciones de la normativa *UNE-EN 12390-1* (2013). El llenado se realiza en tres fases. Para no interferir en los resultados de los ensayos es crucial que durante el llenado de los moldes no se aplique ningún tipo de fuerza o energía de compactación. El último paso necesario antes de compactar es alisar la base superior de la probeta retirando con cuidado el hormigón sobrante.

Una vez los moldes están rellenos se efectúa el proceso de compactación. En este caso, se utilizó la máquina “Ibertest Autotest-200/10”. Su carga máxima es de 10 KN. La carga se realizó a una velocidad de 20 mm/min. Como se ve en la figura 3.2.c la máquina se compone de una base móvil y una zona superior donde se instala un cilindro de compactación. El cilindro mide 65 mm de altura y 95 mm de diámetro. Se coloca la muestra encima del pistón de la zona inferior. Entonces el pistón empieza a subir hacia el cilindro de compactación, hasta que éste entra en contacto con la probeta. Una vez el cilindro y la probeta están en contacto, la muestra empieza a reducir su longitud a causa de la fuerza de compactación.

Lo que se calcula es el grado de compactación. El grado de compactación es el porcentaje que define la diferencia entre la longitud inicial y la longitud final de la probeta tras el proceso de compactación. Si la longitud inicial es h y la diferencia entre ambas longitudes es Δh , la fórmula para calcular el grado de compactación es: $G.C. = (1 - \Delta h/h) \cdot 100$.

3.7 ALMACENAMIENTO

Una vez terminado el proceso de compactación, se almacenaron las probetas de hormigón poroso. El almacenamiento es un proceso importante para el curado del material. Las primeras 24 horas son claves para obtener los mejores valores de las propiedades. Durante estas 24 horas el hormigón pasa del estado fresco al estado endurecido. En el presente experimento las probetas se cubrieron con una lona de plástico. Posteriormente fueron desmoldadas e introducidas en un recipiente con agua. Para su correcta conservación, las probetas deben quedar totalmente sumergidas.

3.8 ENSAYOS

Antes de empezar los ensayos, los especímenes fueron extraídos de su sumersión en agua. Para obtener las condiciones establecidas en las normativas, las probetas fueron sacadas 72 horas antes de los ensayos. Después de 72 horas se asegura que la probeta está totalmente seca.

3.8.1 ENSAYOS DE POROSIDAD Y DENSIDAD

El primer paso fue medir la altura, el diámetro y el peso seco de las probetas. A continuación, se calculó el peso hidrostático, sumergiendo la probeta en agua durante 48 horas. Para ello, se usó una balanza hidrostática. La balanza hidrostática (véase la figura 3.3.a) funciona de la siguiente manera: de la parte inferior de la balanza sale un hilo que lleva un gancho en la punta. Se engancha una cesta en el gancho. Dentro de la cesta se introduce la probeta, tal y como muestra la figura 3.3.b, y se sumerge y se deja flotando la cesta y la probeta en un recipiente lleno de agua (figura 3.3.c). Como la cesta ya estaba pesada con anterioridad, al peso resultante en la balanza (una vez se ha estabilizado) se le resta el peso de la cesta y así se obtiene el peso hidrostático. Con estas mediciones se pudo obtener el valor de porosidad de las probetas (gracias a la ecuación 3.1) y el valor de densidad (ecuación 3.2).



Figura 3.3. Ensayo peso hidrostático; (a) Balanza hidrostática; (b) Elementos del ensayo de peso hidrostático; (c) Funcionamiento del ensayo de peso hidrostático;

$$P = \left[1 - \frac{4 \cdot (W_1 - W_2)}{\rho_w \cdot \pi \cdot \phi_s^2 \cdot L_s} \right] \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$D = \frac{4 \cdot W_1}{\pi \cdot \phi_s^2 \cdot L_s} \quad (3.2)$$

3.8.2 ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

El ensayo seleccionado para calcular la permeabilidad fue en el ensayo de Permeámetro de Carga Constante. Si bien es cierto que el ensayo de carga constante no es un ensayo que aparezca en las normativas (como se puede leer en el apartado 2.4 del trabajo), en los últimos años su uso se está extendiendo por encima del ensayo de carga variable. Como no está estandarizado, describir la metodología de construcción del permeámetro es vital para entender su funcionamiento.

Para empezar, las piezas necesarias para la construcción del permeámetro son dos piezas de PVC (figuras 3.4.b y 3.4.c), cinta adhesiva de pintor, cinta adhesiva de aluminio, una cinta de caucho y 5 pernos circulares (figura 3.4.a). A parte, se usó un palo de madera con tres pernos para sujetar el permeámetro mientras se realizaba el ensayo de permeabilidad. Es importante recordar que al no ser un ensayo estandarizado, muchas son las variantes que se pueden encontrar en la literatura.



Figura 3.4. Piezas del permeámetro de carga constante; (a) Pernos circulares; (b) Pieza de PVC de la parte inferior; (c) Pieza de PVC de la parte superior;

La idea fundamental del permeámetro es calcular el agua que se filtra a través de la probeta en un período de tiempo determinado y una superficie conocida. Por eso, las paredes de la probeta se tuvieron que impermeabilizar. El agua sólo podía filtrar a través de las bases de la probeta, haciendo más sencillo el cálculo de la superficie en la fórmula de la permeabilidad. El proceso de montaje y desmontaje del permeámetro, tal y como se hizo, duró aproximadamente treinta minutos para cada probeta. Mientras el montaje fue largo, la medición de la permeabilidad se consiguió en menos de dos minutos.

Se empezó colocando la pieza de PVC de la parte superior (figura 3.4.c) sobre una superficie plana. Seguidamente se apoyó la probeta encima del tubo de PVC y se le aplicó la primera capa de impermeabilización. Esta primera capa es la que se realizó con cinta de aluminio, tal y como se muestra en la figura 3.5.a. Después se colocó la pieza de PVC de la parte inferior en la otra base de la probeta (véase la figura 3.5.b). Tras la colocación de la pieza de PVC, se aplicaron la segunda y la tercera capa de impermeabilización, como en la figura 3.5.c. Estas dos capas se realizaron con cinta adhesiva de carpintero. Cuando la probeta estuvo bien envuelta, el siguiente paso fue la impermeabilización final. Para ello, se procedió a envolverla con una cinta de caucho anclada gracias a unos pernos circulares (véanse las figuras 3.5.d y 3.5.e). Finalmente se fijó la probeta al palo de madera que lleva tres pernos. Ese mismo palo de madera contenía una pequeña pieza metálica para colgarlo y poder realizar el ensayo.



Figura 3.5. (a-e) Pasos para la construcción del permeámetro de carga constante;

En el apartado 2.4 se explica el funcionamiento general del ensayo de permeámetro de carga constante. A continuación, se muestra el funcionamiento específico que se utilizó en este estudio. Lo primero fue colocar la probeta en un lugar donde se pudiese realizar el ensayo con facilidad. En este caso, se colgó de la pared, como se muestra en la figura 3.6.a.

Primero, se calculó el volumen inicial. Este volumen inicial (V_0) es el volumen de agua entre la base del permeámetro y la base superior de la probeta (véase la figura 3.6.b). Se tapó la base inferior del permeámetro y se empezó a llenar de agua hasta que el nivel de agua saturaba la probeta. Cuando esto ocurría, se abría la base del permeámetro y se recolectaba el agua en un recipiente. Una vez calculado el volumen inicial, se procedió a la realización del ensayo tal como se detalla en el apartado 2.4.3. Cuando el caudal se estabilizó en ese nivel de agua, se colocó un recipiente debajo de la salida del permeámetro para recolectar el agua que durante 1 minuto atravesaba el permeámetro. Ese volumen obtenido es el volumen total del ensayo (V_t).

Con los datos obtenidos, se calculó la permeabilidad de las probetas gracias a la “Ley de Darcy”. La ecuación 3.3 muestra la fórmula para la obtención de los resultados de permeabilidad.

$$K = \frac{4 \cdot q \cdot L_{HP}}{\pi \cdot \phi_{HP}^2 \cdot h \cdot t} \quad (3.3)$$

En la ecuación 3.3, q es la diferencia entre los dos volúmenes de agua ($V_t - V_0$); h es la altura entre la base del permeámetro y el nivel de agua para calcular V_t ; t es el intervalo de tiempo para la medición del volumen y, finalmente, ϕ_{HP}^2 y L_{HP} son las dimensiones de la probeta.

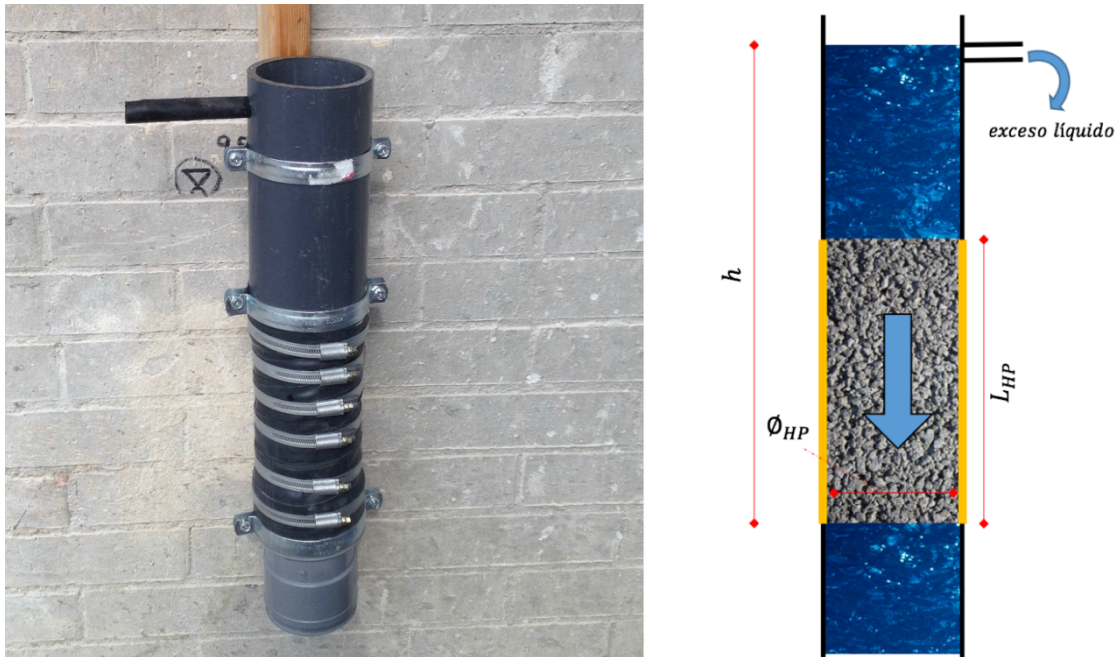


Figura 3.6. Ensayo de permeabilidad con permeámetro de carga constante; (a) Colocación del permeámetro; (b) Esquema del ensayo de permeabilidad;

3.8.3 ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA

Tras obtener los valores de densidad, porosidad y permeabilidad con ensayos no destructivos, fue necesario hacer también ensayos destructivos. Estos ensayos se realizaron para conocer la resistencia a compresión y a tracción del hormigón poroso. Se usaron el 40% de las probetas para el ensayo de resistencia a compresión. También se usó otro 40% de las muestras para el ensayo de resistencia a tracción. El otro 20% se dejó sin ensayar para tener margen de error en el caso que ocurriera alguna incidencia.

Además de llevar a cabo los ensayos, también se realizó una inspección visual de las probetas, antes y después de las diferentes caracterizaciones. La Norma *UNE-EN 12504-1* (2009) apenas establece otros requerimientos antes del ensayo además de la mera inspección visual para identificar posibles anomalías.

A continuación se definen los 2 ensayos que se instrumentaron para obtener los resultados. Pero para poder comprender estos ensayos, antes es crucial conocer la maquinaria usada. Para ambos ensayos se usó la “*Instrom 8803*”, una máquina con una

célula de carga de 200 *KN* y un 1% de precisión. Ésta opera en modo de desplazamiento controlado con una velocidad de 0,1 *mm/min*. Si bien es cierto que la “*Instrom 8803*” no fue la primera opción que se contempló, ya que en un primer instante se pensó en la máquina “*Ibertest Autotest-3000*”. Su célula de carga es de 3000 *KN* y un 1% de precisión. Igual que la “*Instrom 8803*”, esta máquina opera en modo de desplazamiento controlado con una velocidad de 0,1 *mm/min*. El grupo de probetas ‘400-20’ fue ensayado con esta máquina. Sus altos valores de carga crearon muchos problemas y por este motivo se optó por cambiar de maquinaria.

El funcionamiento del ensayo de resistencia a compresión se muestra en la figura 3.7.b. La normativa *UNE-EN 12390-3* (2009) rige las particularidades para el ensayo de resistencia a compresión.



Figura 3.7. Ensayo de resistencia a compresión; (a) Montaje del ensayo de resistencia a compresión en la presente campaña experimental; (b) Esquema del ensayo de resistencia a compresión;

Para el correcto funcionamiento del ensayo, la máquina tiene que estar en contacto con ambas bases de la probeta. Para conseguirlo fue necesario añadir a las bases superiores una fina capa de mortero. El motivo fue que, debido al proceso de fabricación y compactación, las bases superiores no quedaron planas ni paralelas a las bases inferiores de las probetas. Según la *UNE-EN 12390-3* (2009), el refrentado debe ser tan fino como sea posible y no debe tener más de 5 mm de grosor. Tras el refrentado de las probetas se procedió al inicio del ensayo. El ensayo se realizó con la velocidad de carga de la máquina “*Instrom 8803*”, es decir, 0,1 *mm/min*. Esta velocidad de carga está dentro del rango establecido en la norma *UNE-EN 12390-3* (2009). Además, el ensayo se realizó con control de desplazamiento para obtener la curva tensión-deformación del hormigón de todas las probetas ensayadas.

Para el ensayo de resistencia a tracción se usó el método de tracción indirecta o ensayo brasileño. Éste consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas

hasta alcanzar la rotura a tracción, como en la figura 3.8.b. El ensayo se realizó con la velocidad de carga de la máquina “*Instrom 8803*”, es decir, 0,1 mm/min. Este ensayo se rige por la normativa *UNE-EN 12390-6* (2010).

Para poder seguir la normativa se usó un dispositivo que permite hacer el ensayo con probetas cilíndricas. En la figura 3.8.b se puede ver cómo es dicho dispositivo. Entre las probetas y el dispositivo se deben incorporar bandas de apoyo para apaciguar el contacto entre el hormigón y el metal del dispositivo.

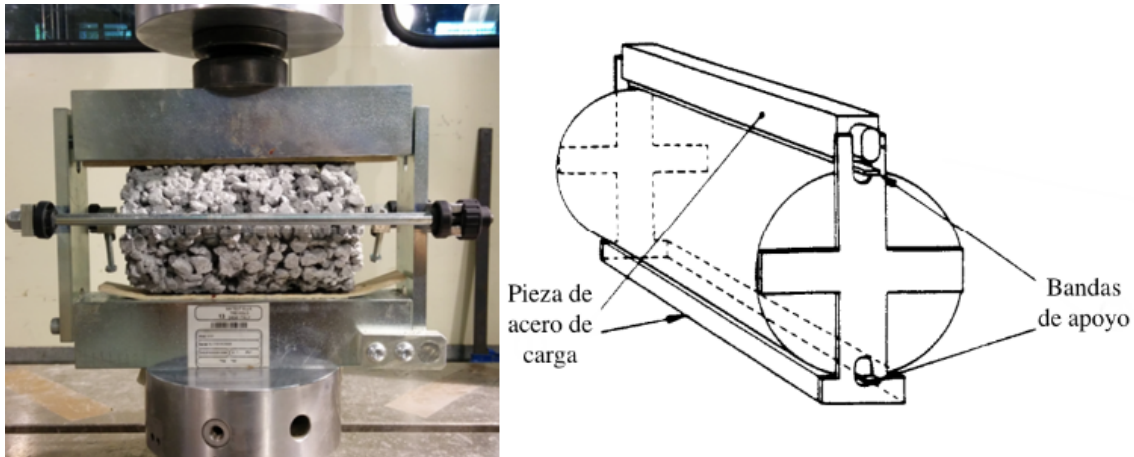


Figura 3.8. Ensayo de resistencia a tracción indirecta; (a) Montaje del ensayo de resistencia a tracción indirecta en la campaña experimental; (b) Dispositivo de ensayo para probetas cilíndricas [UNE-EN 12390-6 (2001)];

Tras la recopilación de la literatura relacionada con la campaña experimental y, con todo lo que se ha contado en este capítulo, ya se puede empezar la experimentación y la toma de resultados. En el próximo capítulo se muestran los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio.

4. RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Los resultados de la campaña experimental se muestran en el presente capítulo. Dicha campaña se llevó a cabo durante el curso académico 2014/2015. Más concretamente entre septiembre de 2014 y julio de 2015. El lugar de realización de la campaña experimental fue el laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló de la UPC. El objetivo del presente capítulo es mostrar de la forma más visual, y fácilmente entendible, los valores obtenidos tras los experimentos en el laboratorio. En definitiva, el propósito principal del estudio es analizar la influencia del grado de compactación y de la dosificación de cemento en las propiedades del hormigón poroso.

El capítulo se estructura tal y como se muestra en la figura 4.1. Tras una pequeña introducción, se examinará el proceso de compactación. Básicamente se explicará por qué determinar el comportamiento del material durante dicho proceso es indispensable para el análisis de los resultados. A continuación, se estudiará la porosidad y a partir de aquí, se analizarán el resto de propiedades en función de ésta. Cada análisis de las propiedades tendrá la misma estructura: observación y explicación del comportamiento en líneas generales, análisis de la influencia del grado de compactación, análisis de la influencia de la cantidad de cemento y, por último, comparación de la contribución de cada variable. El análisis de los resultados servirá para confirmar o desmentir las hipótesis que se han ido construyendo a lo largo del trabajo.



Figura 4.1. Organización del capítulo número 4: Resultados

4.2 PROCESO DE COMPACTACIÓN

El hormigón poroso en estado fresco, justo después de su composición, tiene valores de porosidad de 50% aproximadamente. Sin embargo, el rango de porosidades visto en las aplicaciones del material están entre el 15% y el 35%. En esa diferencia de porosidad juega un papel importante el proceso de compactación. Dicho proceso es clave para obtener un hormigón con valores de resistencia mecánica suficientes sin comprometer la capacidad de drenaje.

Aunque la compactación sea un proceso clave en el hormigón poroso, su investigación no se ha desarrollado hasta los últimos años. A continuación se introduce el método que ha sido la referencia para la aplicación del proceso de compactación. Este método servirá para determinar la respuesta del material a lo largo del proceso de compactación. En el apartado 3.7 se detalla el proceso de compactación seguido para la fabricación del hormigón poroso. Sin embargo, no se explica por qué se usan esos parámetros para su realización. A continuación, se describen los pasos que se han seguido para llegar al proceso de compactación escogido.

Pieralisi (2016), en su tesis, desarrolló un modelo teórico en 2D para la determinación del proceso de compactación. Su objetivo era encontrar un método teórico que evitara el fenómeno de prueba-error. La prueba-error es la metodología consistente en encontrar la solución de un problema realizando ensayos experimentales. Los ensayos en dicho procedimiento duran hasta hallar la solución. Por lo cual, es un método costoso y poco preciso. El coste es tanto económico como de tiempo.

El problema de los métodos existentes hasta la fecha es que su coste computacional es alto. La dificultad para su utilización llevó a *Pieralisi* (2016) a desarrollar un modelo de simulación simplificado. Se basó en los modelos de redes (Lattice Models en inglés). Adaptó los modelos al caso concreto de un material poroso y en estado fresco. Estudió el comportamiento de las partículas en la colocación del material en el molde. También estudió los tipos de contacto que se producían entre partículas y entre partículas y molde. Después realizó múltiples simulaciones para asegurar una valoración representativa ya que la aleatoriedad de gradación del árido y su distribución pueden producir variaciones en los resultados. Más adelante se realizó una campaña experimental para validar los datos de la simulación. Como se puede ver en las figuras 4.2.a y 4.2.b, los resultados experimentales (área gris) se asemejaron a los resultados obtenidos con la simulación.

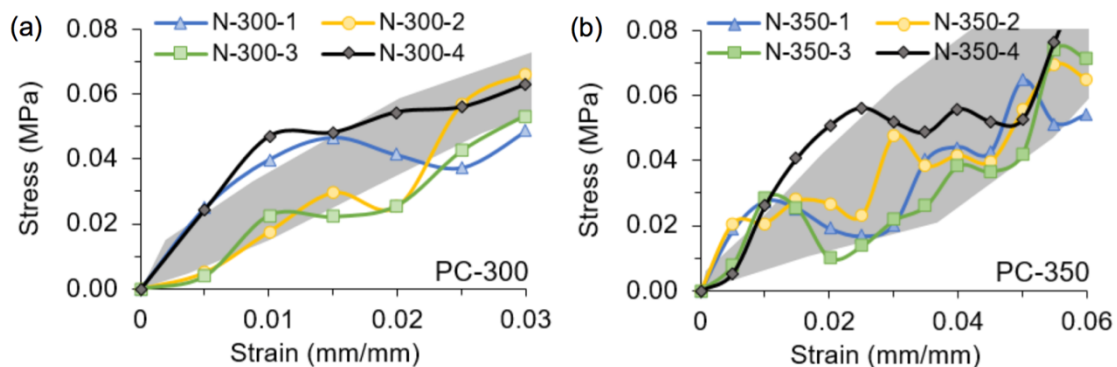


Figura 4.2. Curvas de compactación numéricas comparadas con campaña experimental [*Pieralisi* (2016)];

Con la comparación de los resultados numéricos y experimentales, se demostró que el modelo teórico es capaz de reproducir las curvas de compactación. Asimismo, se comprobó que el modelo es capaz de predecir la repercusión de cambios en la composición del hormigón poroso. De hecho, este método de simulación nos proporciona una herramienta útil para realizar de manera óptima las dosificaciones.

Para confirmar que el modelo teórico es válido, se comparó con un modelo de compactación 3D ya existente. Se utilizó el método DEM (Distinct Element Method) (Cundall *et al.* (1978)). Con el método DEM se realizó el mismo procedimiento que en el modelo de red: una simulación numérica y una campaña experimental. El resultado de estos procesos se muestra en las figuras 4.3.a y 4.3.b. El área gris representa los valores de la campaña experimental y las líneas de colores son los resultados de la simulación.

Las figuras 4.3.c y 4.3.d muestran la combinación de ambos métodos para su análisis y comparación. Se juntaron en una sola gráfica los resultados del método DEM con los resultados del método de redes. Se hizo así para valorar la validez del método desarrollado.

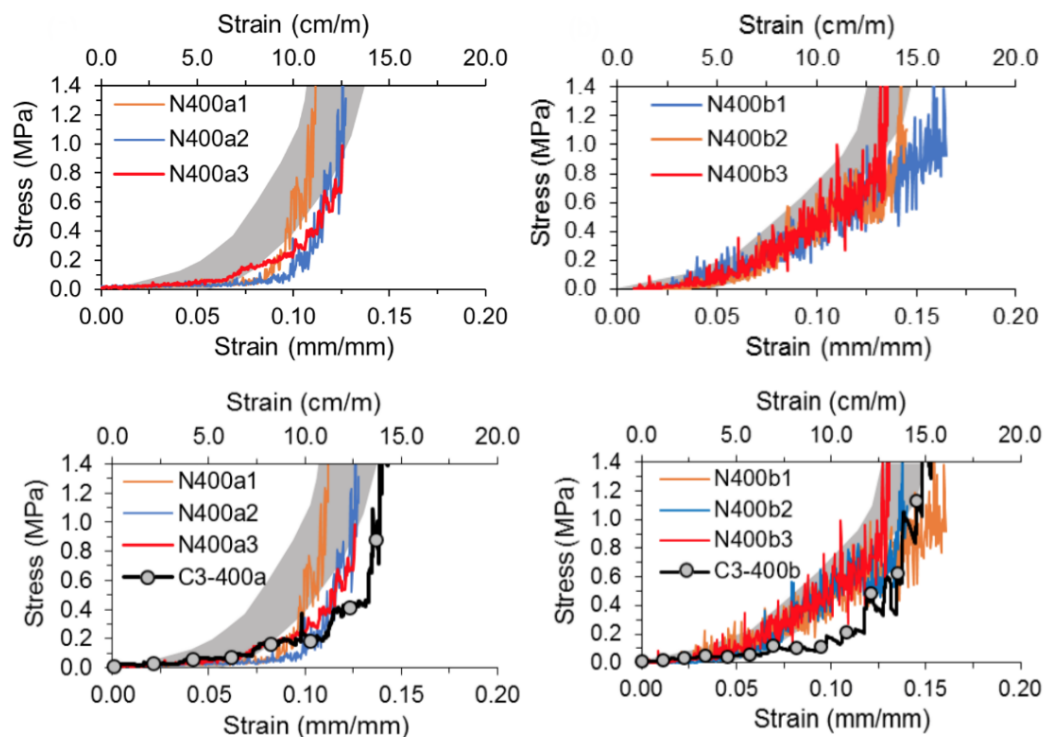


Figura 4.3. Curvas de compactación de modelo teórico existente con el modelo teórico 2D desarrollado [Pieralisi (2016)];

Si se analizan los resultados, el modelo teórico en 2D, basado en el método de redes y adaptado para un hormigón poroso y en estado fresco, es una buena aproximación para la determinación del proceso de compactación. Bien es cierto que el modelo teórico DEM es más realístico. Pero el modelo desarrollado por Pieralisi simplifica la simulación. Dicha simplificación facilita la obtención de los parámetros característicos del proceso de compactación.

Gracias al estudio de modelos teóricos para conocer la compactación, *Pieralisi* (2016) llegó a la conclusión de que se necesita menos presión para compactar los especímenes con mayor tamaño de partículas. Eso se debe a que con tamaños mayores los contactos entre partículas disminuyen, al no haber tantas partículas en la mezcla. Si el número de contactos disminuye, la presión que se debe ejercer sobre la mezcla es menor.

Con respecto al presente trabajo, esta conclusión ayudará a entender el comportamiento del hormigón poroso según el proceso de compactación. Al subir la cantidad de cemento, se reducirá la presión necesaria para la compactación. La razón por la cual un hormigón con mayor contenido de cemento necesita menos presión es que el número de contactos disminuye. Finalmente se llega a la conclusión que si se reduce la presión, la compactación será más eficaz porque se llegará más fácilmente al grado objetivo de compactación.

4.3 POROSIDAD

La porosidad es la propiedad principal de influencia de las características de un hormigón poroso. En el sub-apartado 2.4.1 se habla de la porosidad como “básica para todas las propiedades y para el desempeño del material”. Las hipótesis sobre el efecto de la porosidad sobre las propiedades que se analizan se exponen en la figura 4.4. Estas hipótesis se extraen del capítulo 2. A lo largo del capítulo se analiza la validez de estas hipótesis.

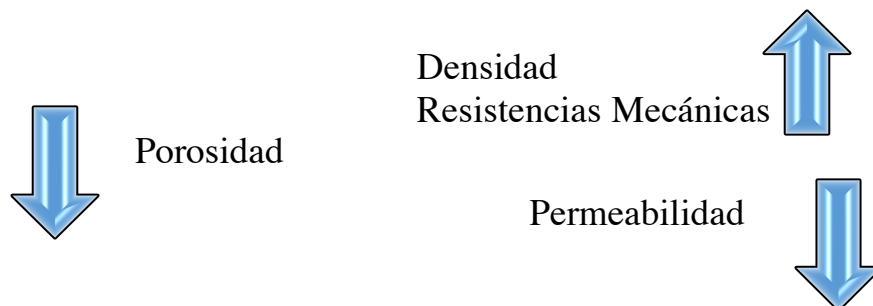


Figura 4.4. Hipótesis sobre la influencia de la porosidad sobre otras propiedades del material;

En la tabla 4.1 se muestra un resumen de los valores de porosidad de las probetas de hormigón poroso. Esta figura aporta el valor de la porosidad mínima y máxima, la porosidad media y la desviación estándar de cada tipología de probetas fabricadas.

De los resultados de la tabla 4.1 se desprende que a mayor compactación, menor será el valor de porosidad. Los resultados son lógicos porque está dentro de lo esperado: al aumentar la compactación se reduce la porosidad. El porqué de esta afirmación es sencillo de dilucidar. Cuando se compacta el material se reduce la cantidad de vacíos del mismo y, si hay menos vacíos, la porosidad disminuye.

Respecto a la cantidad de cemento, la tendencia general es que a mayor cantidad de cemento, menor será la porosidad. Tiene sentido si se piensa en cómo actúa el cemento en la mezcla. Si se añade más cemento en la mezcla, los áridos estarán más envueltos

por pasta de cemento. Los espacios que anteriormente eran vacíos, ahora estarán ocupados por pasta de cemento y si los huecos se reducen, la porosidad baja.

La desviación estándar es una medida de dispersión que sirve para calcular la varianza de los resultados respecto a la tendencia central. En este caso, la desviación estándar se ha calculado como un porcentaje. La desviación estándar varía entre el 2% y el 6% aproximadamente. La mayoría de los resultados están cerca del 5% de desviación estándar o por debajo. Una desviación menor al 10% significa que los resultados obtenidos son precisos. Así que los valores obtenidos en la presente campaña experimental son homogéneos.

NOMENCLATURA	POROSIDAD (%)			DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)
	Compactación Máxima	Compactación Mínima	Media	
300-10	39,2	43,0	41,6	2,9
300-15	33,8	37,9	36,6	4,2
300-20	30,3	36,4	33,8	5,6
350-10	39,2	43,7	41,0	3,4
350-15	37,2	39,5	38,6	2,1
350-20	31,8	38,4	34,2	4,6
400-10	37,7	39,8	38,6	2,0
400-15	33,3	38,5	35,5	5,4
400-20	30,0	34,4	31,6	4,0
450-10	32,8	36,3	34,8	3,3
450-15	31,5	37,3	33,8	5,0
450-20	25,2	30,0	28,1	5,2

Tabla 4.1. Resumen de los resultados de porosidad clasificados según nomenclatura;

Aunque en líneas generales las dos variables estudiadas cumplen con el comportamiento lógico a esperar, hay algunos resultados que no cumplen con las hipótesis. Por ejemplo, los valores de porosidad para una dosificación con cantidad de cemento igual a 350 kg/m^3 son mayores que los de una dosificación con cantidad de cemento igual a 300 kg/m^3 . De hecho, esto puede deberse a distintos factores, como por ejemplo, a errores humanos en los procesos de producción del hormigón. Esto puede influir en el resultado final de las propiedades. Si se analizan las desviaciones estándar se observa que en las probetas de 350 kg/m^3 son inferiores a las desviaciones de las probetas de 300 kg/m^3 . Tener desviaciones tan dispares puede afectar el resultado de los ensayos de porosidad.

También se puede extraer de la información de la tabla 4.1 que el rango de valores de porosidad para este estudio varía entre algo 25% y 44% aproximadamente. Revisando la literatura al respecto, gran parte de los estudios trabajan dentro del rango establecido como idóneo por la ACI 522 (2010). Este rango comprende valores de porosidad de entre 15% y 35%. Como se puede observar, hay valores de porosidad media que se encuentran por encima de los límites de la normativa americana. Son las muestras de hormigón poroso que tienen una escasa cantidad de cemento en la composición (300 y 350 kg/m^3) o aquellos que no han sido suficientemente comprimidos (compactación del 10%). Que sean estas muestras es coherente si se revisa la información descrita con

anterioridad. Lo es porqué la porosidad más alta debe corresponder a los valores con variables de compactación y cantidad de cemento más bajos.

La figura 4.5 muestra con mayor detalle la influencia del grado de compactación sobre la porosidad. Como se puede ver, el aumento del grado de compactación hace disminuir la porosidad. Además, a mayor grado de compactación, mayor es la disminución de la porosidad. Para comprobar esta afirmación simplemente se debe analizar la reducción de la porosidad a lo largo de las diferentes escalas del grado de compactación. La reducción de la porosidad media entre la compactación del 10% y la del 15% es de 2,9%. Mientras que, la reducción de la porosidad media entre la compactación del 15% y la compactación máxima (20%) es de 4,2%. El único grupo que, viendo el gráfico, no sigue la tendencia general es el de las probetas de 300 kg/m^3 .

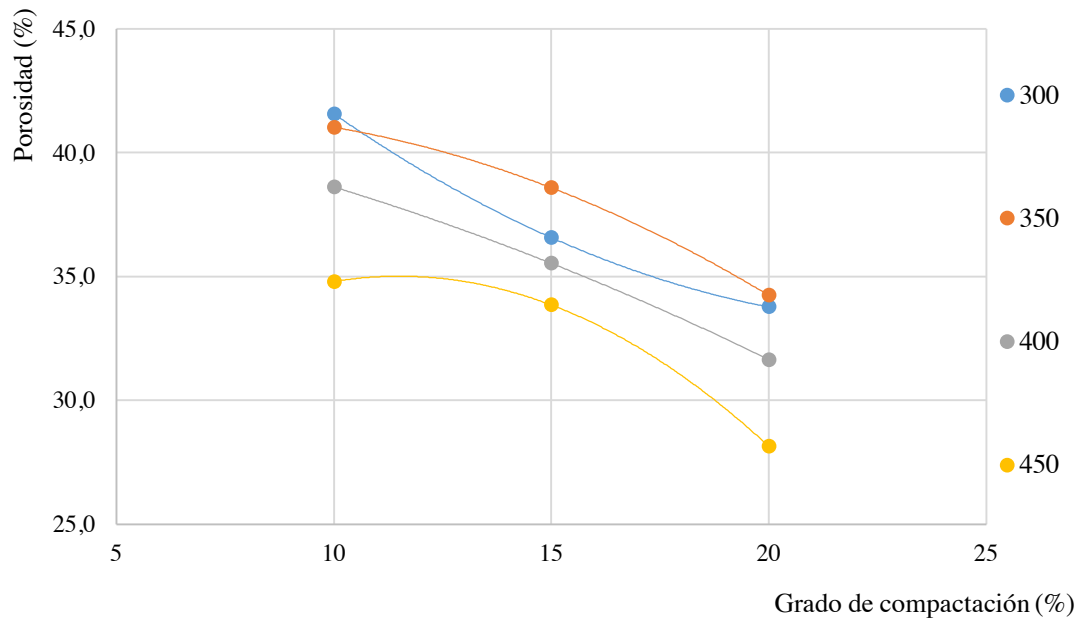


Figura 4.5. Influencia del grado de compactación (%) en la porosidad del hormigón poroso;

La tabla 4.2 complementa los resultados de la figura 4.5. Esta tabla aporta los valores numéricos de las diferencias entre las porosidades medias máximas y mínimas. Se observa que las probetas de 300 kg/m^3 son las que mayor diferencia registran, con un 7,8%. Pero en los otros casos las diferencias son muy similares. La similitud de los valores de la diferencia de porosidad impiden sacar conclusiones sobre la influencia de la combinación de las variables del estudio.

CANTIDAD DE CEMENTO (kg/m^3)	POROSIDAD MEDIA (%)		DIFERENCIA (%)
	Compactación máxima	Compactación mínima	
300	33,8	41,6	7,8
350	34,2	41,0	6,8
400	31,6	38,6	7,0
450	28,1	34,8	6,6

Tabla 4.2. Comparación de la reducción de porosidad en función del grado de compactación;

4.4 DENSIDAD

La tabla 4.3 resume los resultados del ensayo para determinar la densidad del hormigón poroso. La información contenida en la tabla muestra la tendencia central y la desviación estándar de los resultados de densidad. La densidad obtenida en las probetas de hormigón poroso varía entre los 1517,0 kg/m³ de las probetas de 300-10 y los 1753,5 kg/m³ de las probetas de 450-20. Son valores de densidad bajos pero es lógico que sea así ya que los valores de porosidad son altos. La desviación estándar de las tipologías de hormigón poroso está comprendida entre el 1% y el 3%. Respecto a la desviación estándar de las porosidades, en el caso de la densidad, ésta se reduce. Mientras en el estudio de la porosidad se han obtenido variaciones estándar de hasta 6%, la densidad ha alcanzado valores más homogéneos.

NOMENCLATURA	DENSIDAD MEDIA (kg/m ³)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)
300-10	1517,0	2,2
300-15	1567,1	1,9
300-20	1661,0	2,0
350-10	1483,9	2,0
350-15	1526,0	1,8
350-20	1621,2	2,4
400-10	1530,0	1,4
400-15	1582,4	2,7
400-20	1693,6	2,0
450-10	1589,0	2,0
450-15	1623,2	2,3
450-20	1753,5	1,6

Tabla 4.3. Resumen de los resultados de densidad clasificados según nomenclatura;

Los valores de densidad se muestran en la figura 4.6. La densidad está representada en función de la porosidad y dividida según la cantidad de cemento de la mezcla. En líneas generales, se cumple que a mayor porosidad, menor será la densidad. Esto concuerda con lo anticipado en la figura 4.4. La explicación es que cuando se tiene más porosidad también se tiene mayor cantidad de vacíos. Al reducir la cantidad de vacíos y, consecuentemente, la porosidad, el peso se mantiene prácticamente constante pero el volumen disminuye. Es por esa razón que la relación entre la porosidad y la densidad sigue el patrón comentado.

Otro fenómeno que se observa en la figura 4.6 es que el valor de la densidad aumenta a la vez que aumenta la cantidad de cemento. También aumenta la densidad al aumentar el grado de compactación. Este crecimiento de la densidad se explica porque al aumentar la cantidad de cemento, más huecos de la mezcla quedan ocupados por la pasta de cemento, aumentando así el peso sin disminuir el volumen. En el caso del grado de compactación el procedimiento es el contrario. Se mantiene el peso prácticamente constante pero se reduce el volumen de la muestra de hormigón. Esta reducción de volumen se produce porque el proceso de compactación se encarga de llenar los vacíos con áridos o pasta de cemento.

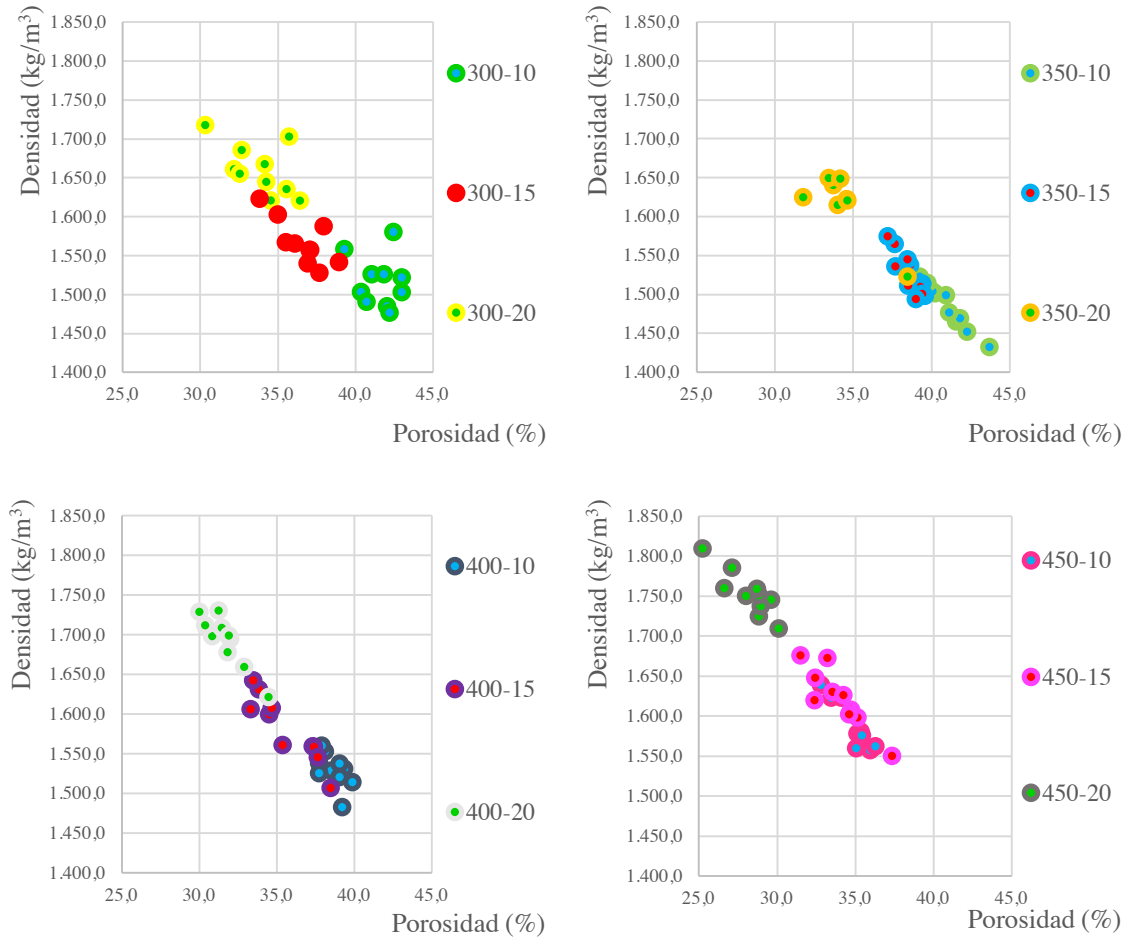


Figura 4.6. Valores de densidad según la cantidad de cemento; (a-d) La cantidad de cemento varía entre 300 y 450 kg/m³;

Para poder analizar el comportamiento general de la densidad de las probetas es necesario juntar todos los resultados en una sola gráfica. La figura 4.7 muestra todos los valores de densidad para las 120 probetas que forman esta campaña experimental. La relación entre la densidad y la porosidad es inversamente proporcional y prácticamente lineal. Esta relación muestra la estrecha conexión entre el valor de la porosidad y de la densidad.

Aunque la porosidad es el factor clave para la determinación de la densidad, el grado de compactación y la cantidad de cemento también tienen su relevancia. Para poder ver cómo afectan estas variables a la densidad, se seleccionaron los grupos de probetas con mayor densidad. Estos grupos son: 300-20, 350-20, 400-20, 450-15 y 450-20. Como se puede apreciar, todos los valores con compactación máxima se encuentran entre los resultados con mayor densidad. Eso significa que para una misma cantidad de cemento, una mayor compactación asegura un valor de densidad superior. Además de las probetas con compactación máxima, se incluyen las probetas de 450-15 entre las tipologías con mayor densidad. Esto demuestra que para un grado de compactación constante, la densidad será mayor para aquellas probetas con mayor cantidad de cemento. Finalmente, estos resultados demuestran que el grado de compactación tiene un mayor peso en la determinación del valor de la densidad que la cantidad de cemento.

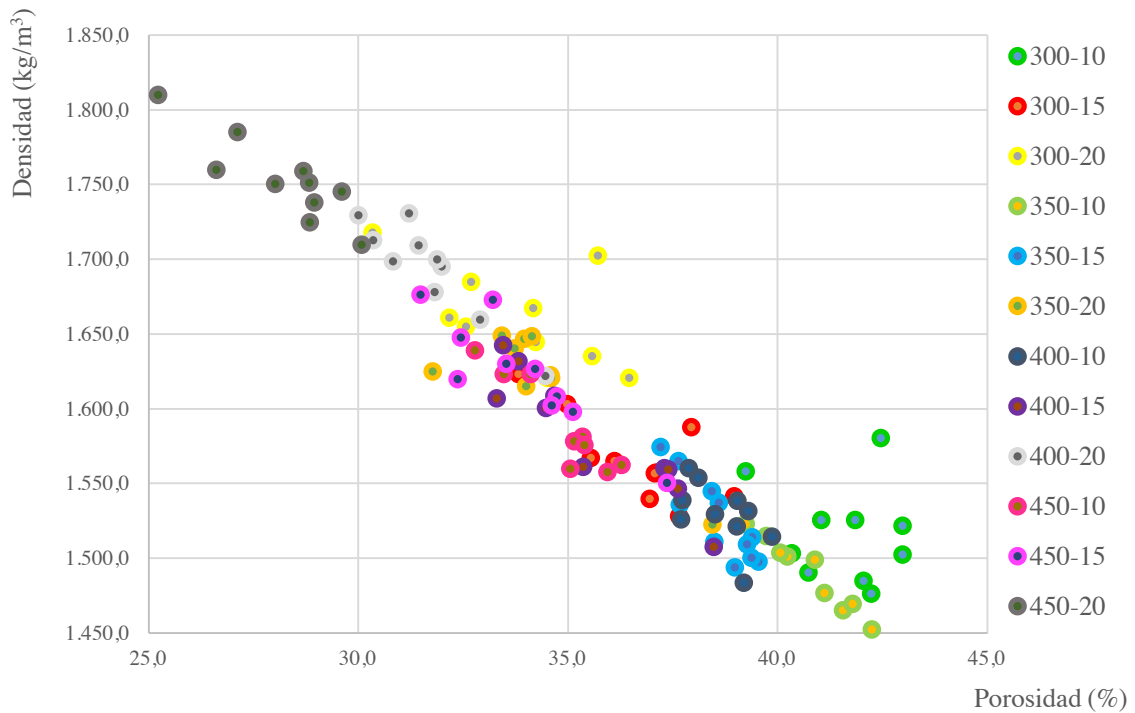


Figura 4.7. Valores de densidad de las probetas de hormigón poroso;

La figura 4.8 sirve para estudiar más detenidamente el efecto del grado de compactación sobre la densidad. La gráfica aporta los valores de densidad en función del grado de compactación. Además, se diferencia los resultados según la cantidad de cemento. La tendencia de crecimiento según el grado de compactación es parecida para todas las tipologías de probetas. Esto se relaciona con los valores de desviación estándar analizados en la tabla 4.3. Como las desviaciones estándar obtenidas han sido reducidas, es lógico que el comportamiento del material sea parecido en todas sus tipologías.

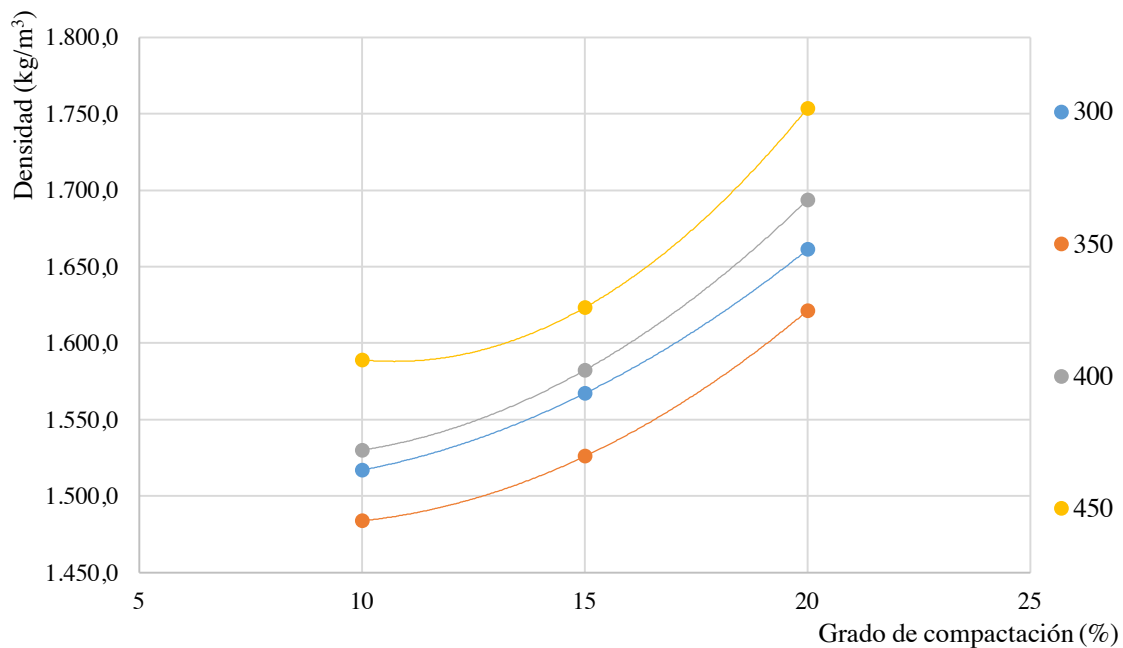


Figura 4.8. Influencia del grado de compactación en la densidad del hormigón poroso;

4.5 PERMEABILIDAD

El resultado del ensayo de permeabilidad ayudará a entender el comportamiento del hormigón poroso respecto a la filtración de agua. De este material se espera que su capacidad de permeabilidad sea alta respecto al hormigón convencional. La tabla 4.4 muestra los resultados de la tendencia central y la desviación estándar de las 120 probetas que fueron ensayadas a permeabilidad. Los valores de permeabilidad están comprendidos entre los 8 mm/s y los 26 mm/s aproximadamente.

NOMENCLATURA	PERMEABILIDAD MEDIA (mm/s)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)
300-10	26,4	5,0
300-15	18,3	19,0
300-20	13,2	21,1
350-10	20,1	9,7
350-15	14,1	7,2
350-20	10,3	20,5
400-10	19,2	7,5
400-15	16,6	14,5
400-20	8,2	14,3
450-10	15,3	12,0
450-15	14,3	9,1
450-20	8,4	10,0

Tabla 4.4. Resumen de los resultados de permeabilidad clasificados según nomenclatura;

Los resultados muestran unos valores de permeabilidad altos. Si se revisan los datos de la tabla 2.4 del capítulo 2, se confirma que son valores elevados de permeabilidad. Pero, entre los resultados de ensayos con permeámetro de carga constante, están dentro de lo habitual. Al analizar los datos de desviación se detecta que la varianza de los resultados ha aumentado considerablemente respecto a los datos de porosidad y densidad. La desviación estándar varía entre 5% y 21% aproximadamente. Algunos valores (300-20 y 350-20) superan el 20% de desviación estándar. Una desviación estándar mayor de 20% no arroja datos suficientemente fiables. En este caso, como los valores son próximos al límite de 20%, se seguirá con el proceso de análisis incluyéndolos.

La razón principal de este aumento de la varianza es que el factor humano tiene un papel fundamental en el ensayo de permeabilidad. Recordando el ensayo de permeabilidad con permeámetro de carga constante (apartado 2.4.2) se observa que es necesario un gran aporte de la persona encargada de realizar el ensayo. La precisión del ensayo se ve comprometida si lo comparamos con ensayos que no requieren de un trabajo humano tan directo. Por ejemplo, en los ensayos de resistencia mecánica, al usar una máquina para cargar las probetas el factor humano no afecta tanto como en el caso del estudio de la permeabilidad.

Tras observar los resultados numéricos, el siguiente paso en el análisis es visualizar el comportamiento general de las diferentes tipologías de hormigón poroso. Para dicho análisis se muestran los resultados en función de la porosidad y divididos según la cantidad de cemento en la figura 4.9.

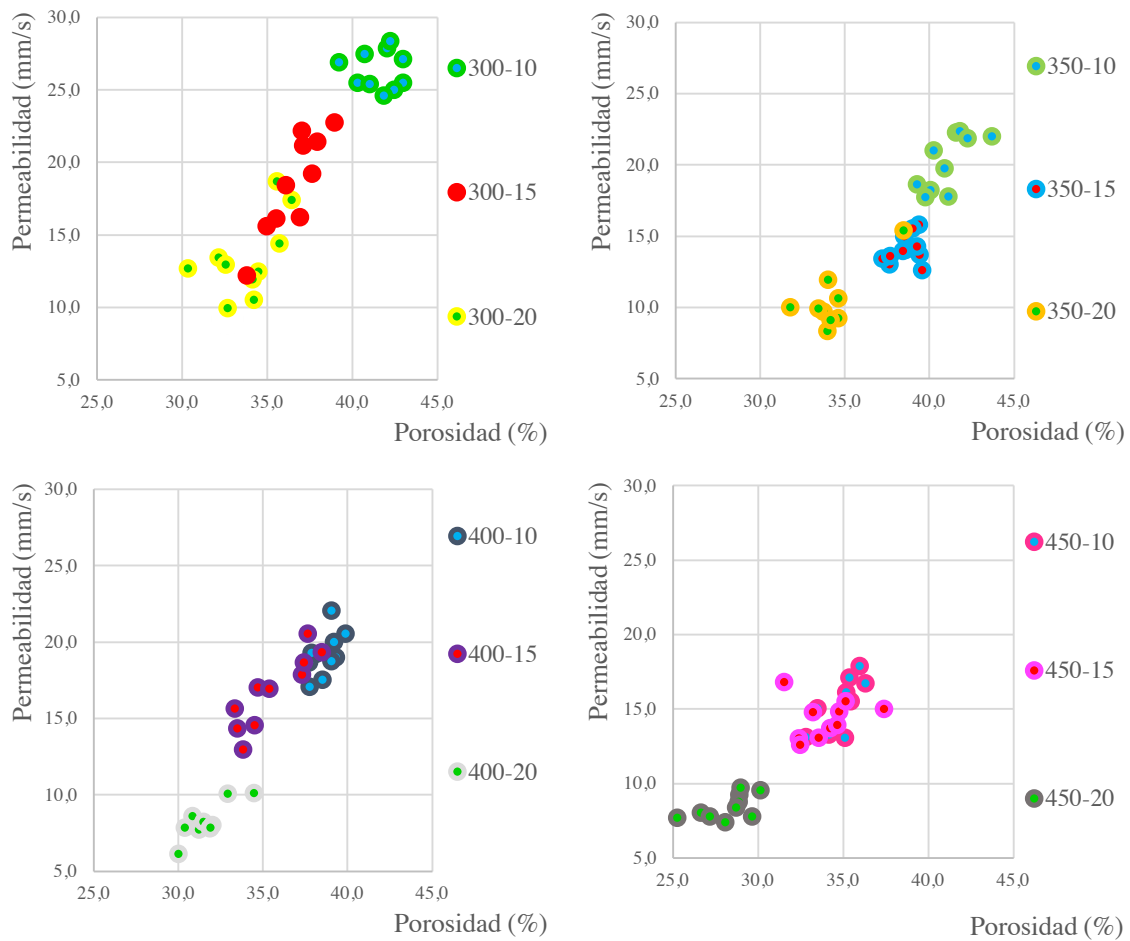


Figura 4.9. Valores de permeabilidad según la cantidad de cemento; (a-d) La cantidad de cemento varía entre 300 y 450 kg/m³

La tendencia de los resultados de permeabilidad de las probetas de hormigón poroso es que al aumentar la porosidad, aumenta la permeabilidad del material. Como ya pasó con la densidad, los resultados de este ensayo confirman la hipótesis elaborada en el apartado 4.3. La porosidad es el porcentaje de vacíos que contiene una mezcla y la permeabilidad la capacidad de transporte de agua a través de un material en un intervalo de tiempo. Por eso es coherente obtener resultados que muestren que a mayor porosidad, mayor permeabilidad.

Otro aspecto importante que vemos en la figura 4.9, y que también se observa en la tabla 4.4, es la variación de los resultados según las variables del grado de compactación y de la cantidad de cemento. Respecto a la compactación, se ve que cada tipología de hormigón poroso disminuye su permeabilidad con el aumento del grado de compactación. De la misma manera, cada aumento de la cantidad de cemento disminuye el valor de la permeabilidad. Ambos casos son lógicos ya que las dos variables al crecer disminuyen la porosidad. Si disminuyen la porosidad, también lo hacen con la permeabilidad.

En la figura 4.10 se visualizan los resultados de permeabilidad de toda la campaña experimental. La relación entre la permeabilidad y la porosidad pierde la linealidad en la relación que existía entre densidad y porosidad.

La razón por la cual la relación entre parámetros no es lineal es que la permeabilidad depende de más variables. Por ejemplo, la estructura interna de los poros determina las características de permeabilidad de una probeta. Se pueden observar probetas con las mismas dimensiones y la misma porosidad pero con permeabilidades diferentes. Eso se debe a que cada muestra tendrá una estructura interna de vacíos que variará el curso del agua a través del material. El proceso de compactación es el encargado de homogeneizar estas variaciones aunque, tras la compactación, aún seguirán existiendo diferencias entre muestras.

Otro aspecto destacable de la figura 4.10 es que los valores de las diferentes tipologías de hormigón poroso presentan una dispersión destacable entre sus valores. Esto se relaciona con los valores de la varianza que hemos calculado en la tabla 4.4. Las razones son: los factores humanos y que la varianza de la permeabilidad es mayor que el resto de propiedades estudiadas hasta el momento.

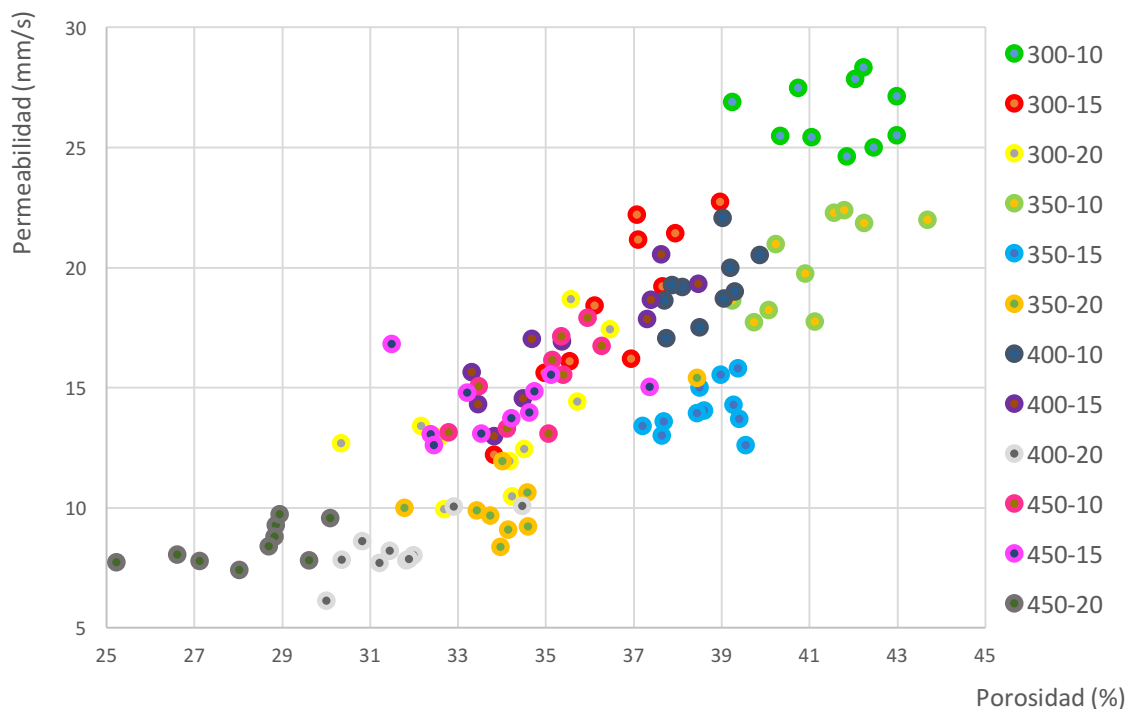


Figura 4.10. Resultados del ensayo de permeabilidad en función de la porosidad;

Por último, se analiza la influencia del grado de compactación a lo largo de los escalones de compactación y según la cantidad de cemento. La figura 4.11 lo muestra. Aunque la varianza en los resultados se puede observar al analizar el gráfico, la tendencia general cumple con las hipótesis que se han comentado sobre la propiedad. Si bien es cierto, que las probetas de 350 kg/m³ sean las que obtienen menor permeabilidad para compactación del 15% y las probetas de 400 kg/m³ la menor permeabilidad para compactación máxima, la tendencia muestra que el decrecimiento de la permeabilidad va relacionado con el aumento de la cantidad de cemento y del grado de compactación. Lo que ocurre es que el grado de compactación cumple con esta afirmación en todos los casos del estudio mientras que la cantidad de cemento no lo hace. Esto demuestra que la influencia en los resultados de permeabilidad es mayor para el grado de compactación que para la cantidad de cemento.

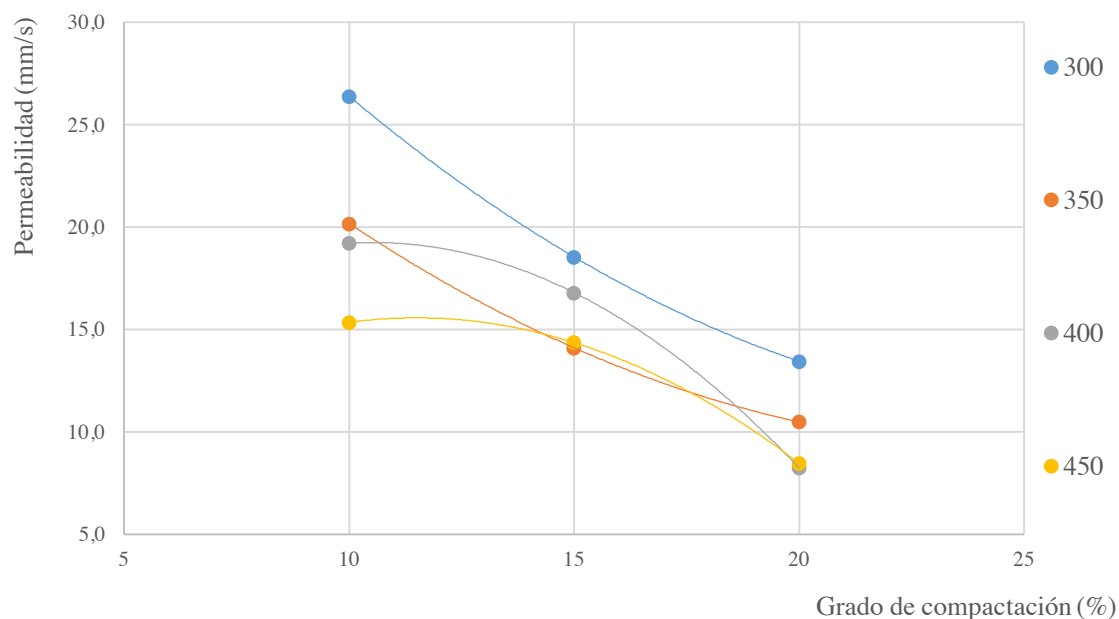


Figura 4.11. Influencia del grado de compactación en la permeabilidad del hormigón poroso;

4.6 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Los resultados de la resistencia a compresión se muestran en este apartado. En la tabla 4.5 se muestran la resistencia a compresión media y la desviación estándar de cada tipología de hormigón poroso. Los valores de resistencia a compresión media son de 3,3 MPa hasta 6,5 MPa. Los valores de la desviación estándar son parecidos a los obtenidos con la permeabilidad, pero las razones son distintas. En este caso, las varianzas son elevadas porque, al ser un ensayo destructivo, se ha ensayado sólo el 40% de las probetas. A mayor número de ensayos te aseguras un mejor valor de la desviación estándar. Al poder ensayar sólo 4 probetas la precisión del estudio podría verse comprometida. Pero los valores de desviación estándar demuestran que el ensayo no se ha visto comprometido.

NOMENCLATURA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN MEDIA (MPa)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)
300-10	3,3	16,4
300-15	3,5	10,0
300-20	3,9	20,8
350-10	3,4	14,3
350-15	3,7	13,2
350-20	4,8	15,2
400-10	3,6	8,0
400-15	4,1	10,6
400-20	6,0	13,7
450-10	4,5	11,8
450-15	5,0	7,9
450-20	6,5	12,0

Tabla 4.5. Resumen de los resultados de resistencia a compresión clasificados según nomenclatura;

Para entender la respuesta de la resistencia a compresión para las probetas de hormigón poroso, es necesario observar la figura 4.12. En ella se visualizan 4 gráficas dónde se estudia la resistencia a compresión en función de la porosidad. Las gráficas se dividen según la cantidad de cemento que tengan en la mezcla.

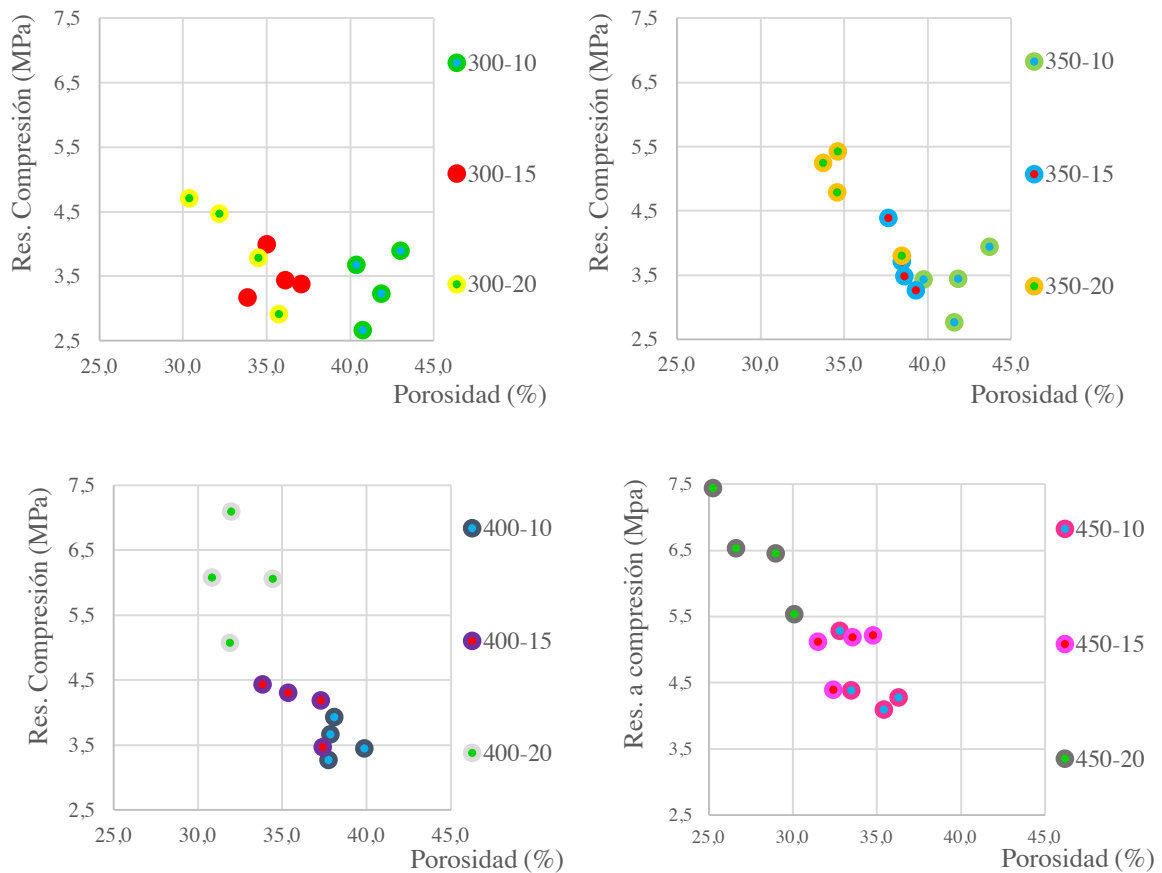


Figura 4.12. Valores de resistencia a compresión según la cantidad de cemento; (a-d) La cantidad de cemento varía entre 300 y 450 kg/m³

La primera conclusión que se extrae del análisis de la figura 4.12 es que la resistencia a compresión crece si la porosidad disminuye. La explicación física a este resultado es sencilla: al reducir la porosidad, las uniones entre partículas son más frecuentes. Al aumentar la resistencia de la unión de las partículas, aumenta la resistencia del material.

Otro aspecto que se observa en la figura 4.12 es que el aumento del grado de compactación produce un aumento en la resistencia a compresión. Además, el incremento de la cantidad de cemento también produce un aumento de la resistencia. La compactación del material provoca una optimización en las uniones de las partículas que incrementan su resistencia. Esto es así porque al compactar, aumentamos la interconectividad de las partículas del agregado grueso creando un material más denso y compacto. La cantidad de cemento crea una película alrededor de las partículas. Así pues, si se aumenta la cantidad de cemento, esta película envuelve en mayor grado a las partículas y crea uniones entre partículas más resistentes.

La figura 4.13 presenta los 48 resultados del valor de resistencia a compresión en función de la porosidad. La tendencia de los resultados muestra un comportamiento del material diferente al visto hasta ahora con la densidad o la permeabilidad. Es cierto que la resistencia a compresión depende de la porosidad pero, sin embargo, su influencia no es tan importante como en las otras propiedades estudiadas hasta el momento. En el resultado de resistencia a compresión, el grado de compactación y la cantidad de cemento ganan protagonismo en la caracterización del material. Dicho aumento del protagonismo va relacionado con el proceso de mezcla. La característica principal de la resistencia a compresión en un hormigón poroso es la unión entre la pasta de cemento y los agregados gruesos. Esta mezcla entre los componentes es la que aporta la resistencia al material. Para una buena unión es necesario una óptima dosificación y un correcto proceso de compactación. Es por eso que, en la obtención del valor de resistencia a compresión, las variables de compactación y dosificación ganan influencia y, dicho aumento de influencia va en detrimento de la influencia de la porosidad.

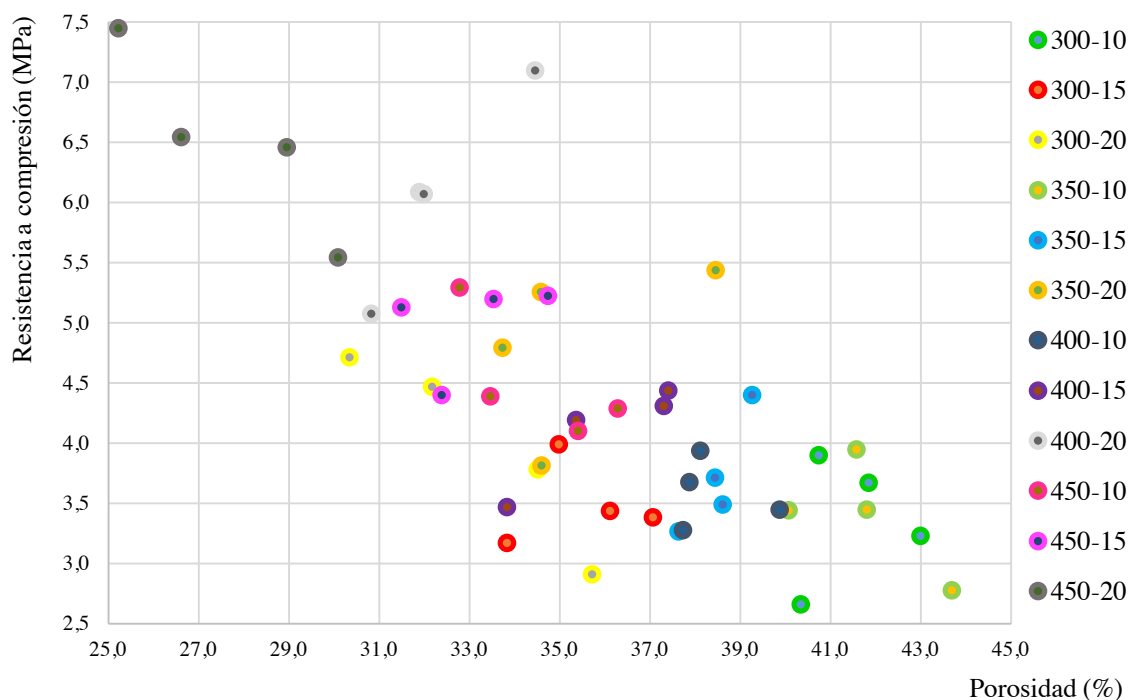


Figura 4.13. Resultados del ensayo para la determinación de la resistencia a compresión;

Finalmente, en la figura 4.14 se estudia la influencia del grado de compactación en las diferentes tipologías de hormigón poroso fabricado. A simple vista se observa que el crecimiento de la resistencia es cada vez mayor al ir aumentando el grado de compactación. También se ve que a mayor cantidad de cemento, mayor es el crecimiento entre los diferentes grados de compactación. Esta gráfica es la demostración que la porosidad pierde influencia, y las dos variables del estudio ganan protagonismo.

En conclusión, la resistencia a compresión es una propiedad del hormigón poroso que, por su estructura interna, es más difícil de predecir su valor. La porosidad no tiene un papel tan determinante como anteriormente. Esta pérdida de protagonismo provoca que el comportamiento del material sea más complejo de predecir.

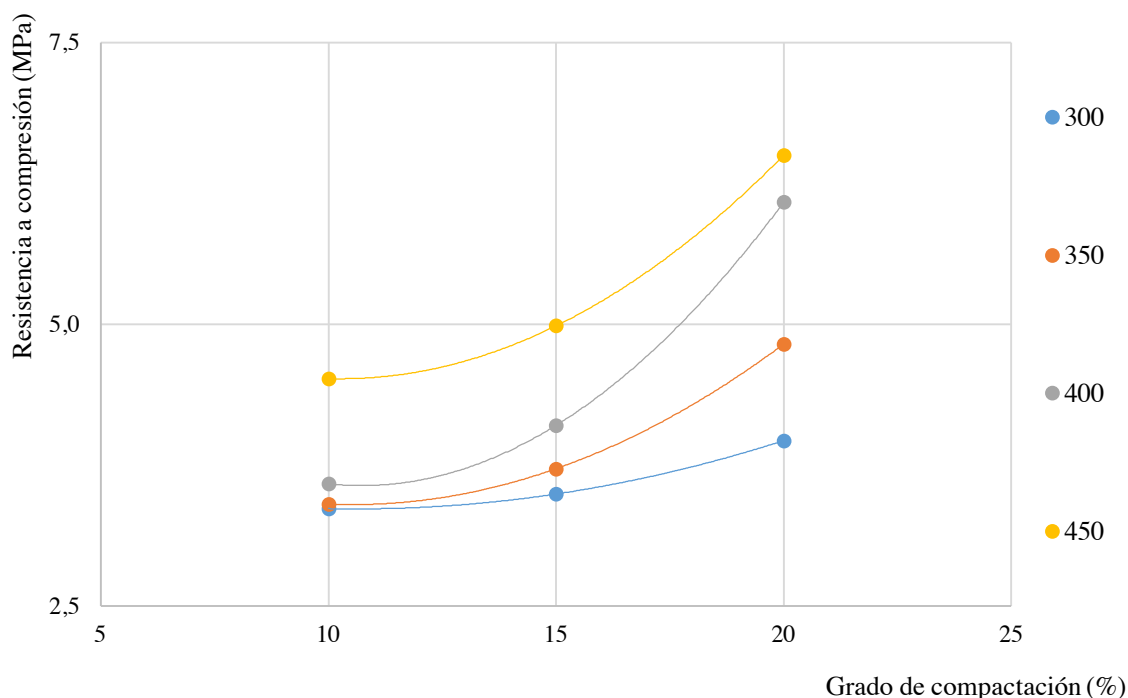


Figura 4.14. Influencia del grado de compactación en la resistencia a compresión del hormigón poroso

4.7 RESISTENCIA A TRACCIÓN

La resistencia a tracción y sus resultados en la presente campaña experimental se muestran en este apartado. A continuación se presentan los resultados de los ensayos. En este caso será importante analizar los resultados comparándolos con los resultados obtenidos en el apartado 4.6. La tabla 4.6 muestra los valores de las medias y las desviaciones estándar de las 48 muestras que fueron utilizadas para la caracterización de la resistencia a tracción.

NOMENCLATURA	RESISTENCIA A TRACCIÓN MEDIA (MPa)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)
300-10	1,6	4,9
300-15	1,6	21,7
300-20	1,9	6,6
350-10	1,3	6,8
350-15	1,6	11,3
350-20	1,9	12,6
400-10	1,6	17,7
400-15	2,0	17,0
400-20	2,6	14,2
450-10	2,0	11,8
450-15	2,0	4,2
450-20	2,8	9,8

Tabla 4.6. Resumen de los resultados de resistencia a tracción clasificados según nomenclatura;

La resistencia a tracción media de las diferentes tipologías de hormigones porosos varían entre los 1,3 MPa de las probetas 350-10 y los 2,8 MPa de las probetas de 450-20. Si se compara el valor de la resistencia a tracción con el valor de la resistencia a compresión, el valor de tracción oscila entre el 40% y el 50% del valor de la resistencia a compresión. En los hormigones convencionales esta relación es menor. Se simplifica diciendo que la resistencia a tracción es un 10% del valor de la resistencia.

La variación estándar muestra unos resultados parecidos a los mostrados en la resistencia a compresión. La varianza va desde un 4,2% para las probetas de 450-15 y un 21,7% de las probetas de 300-15. Existe mucha diferencia entre los valores de variación estándar de las diferentes tipologías de probetas. Una causa puede ser que el número de probetas ensayadas es insuficiente.

La figura 4.15 muestra los resultados de resistencia a tracción en función de la porosidad y divididos por cantidad de cemento. Del mismo modo que con la resistencia a compresión, la disminución de la porosidad implica un crecimiento del valor de la resistencia a tracción. Con ambas resistencias cumpliendo con esta tendencia, se confirma la hipótesis planteada en el apartado 4.3 (figura 4.4). Comparando las tendencias de las muestras de la figura 4.15 con las de la figura 4.12, se observa que el comportamiento general en ambos casos son muy parecidos.

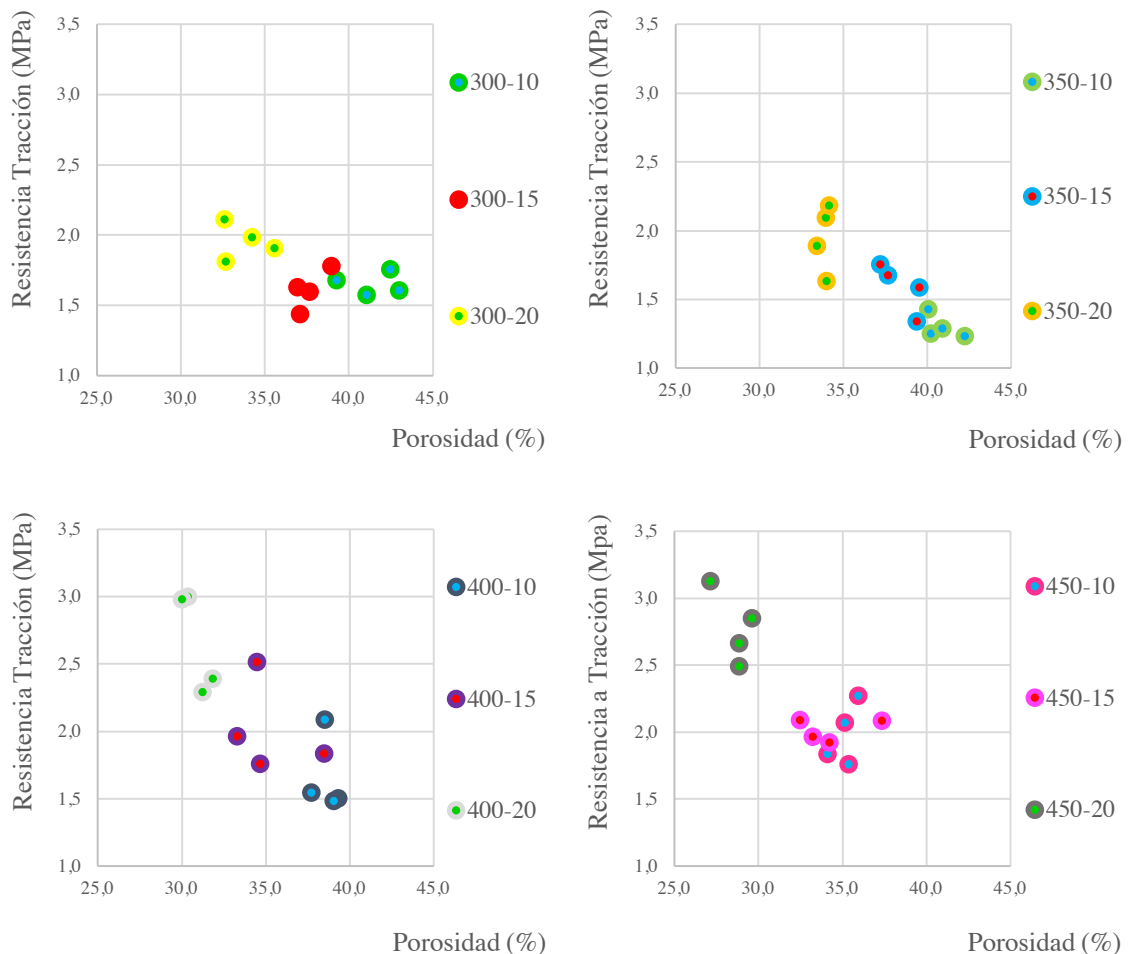


Figura 4.15. Valores de resistencia a tracción según la cantidad de cemento; (a-d) La cantidad de cemento varía entre 300 y 450 kg/m³

Para poder analizar la resistencia a tracción para las diferentes relaciones árido/pasta se debe observar la figura 4.15. A primera vista se observa que la influencia de la cantidad de cemento es mayor que la influencia del grado de compactación. Al comparar los resultados de las probetas de 300-10 y las de 300-20 se ve que no hay mucha diferencia entre los valores de uno y de otro. Sin embargo, si se comparan las probetas de 450-10 y las de 450-20 se ve la diferencia es considerablemente mayor entre ellas. Eso es porque el aumento de la cantidad de cemento reduce la relación árido/pasta. Al ocurrir esta reducción de la relación, el proceso de compactación es más efectivo y tiene mayor repercusión. En definitiva, el grado de compactación es un factor determinante siempre y cuando la relación árido/pasta de la mezcla sea adecuada para la trabajabilidad del hormigón poroso.

La figura 4.16 muestra los resultados de las 48 probetas que fueron ensayadas para la determinación de la resistencia a tracción del hormigón poroso (4 probetas de cada tipología).

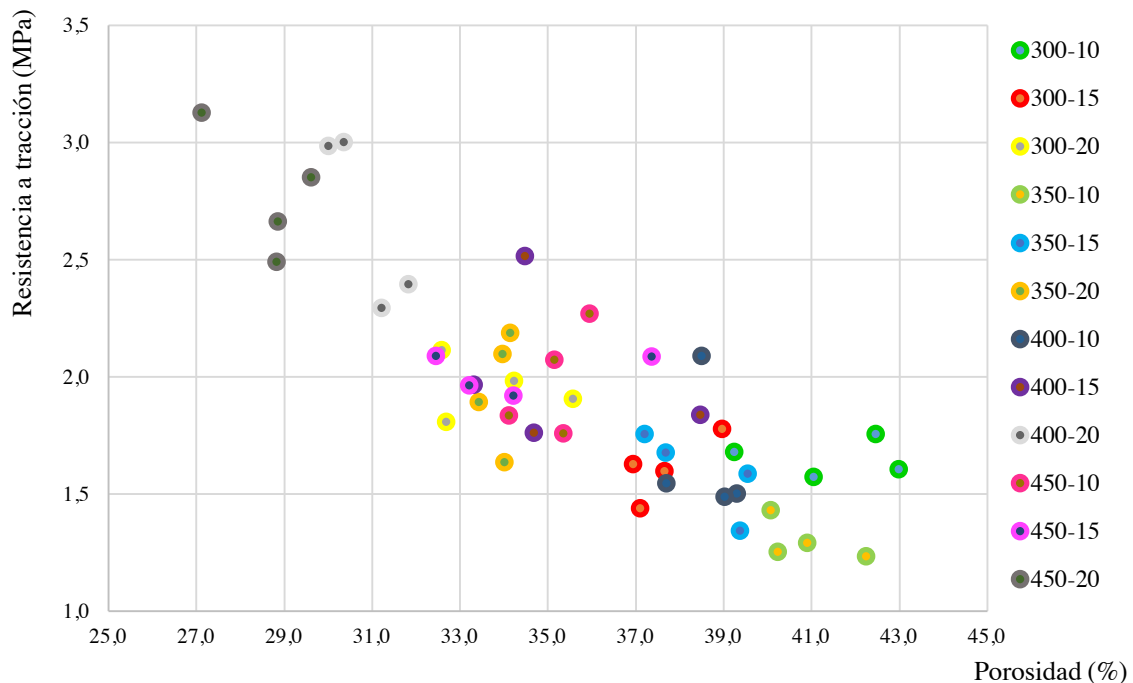


Figura 4.16. Resultados del ensayo para la determinación de la resistencia a tracción;

Analizando los resultados se llega a la conclusión que el comportamiento de la resistencia a tracción es algo diferente a la resistencia a compresión. Mientras que las variables cumplían con sus hipótesis en el caso de la compresión, en la resistencia a tracción las variables no cumplen en cada situación con el comportamiento esperado. Ni la cantidad de cemento ni el grado de compactación cumplen con la hipótesis: “Al aumentar la variable, aumenta la resistencia”. Por ejemplo, las probetas de 300-15 tienen una resistencia a tracción menor que las probetas de 300-10. Otro ejemplo es que las probetas de 350 kg/m³ han resultado tener menos resistencia a tracción que las probetas de 300 kg/m³.

Observando la figura 4.16 se ve un evento remarcable que aporta información interesante sobre el comportamiento del material en función de las variables de compactación y dosificación. Las dos tipologías con mejor respuesta a tracción están considerablemente alejadas del resto de resultados. Estas probetas son las de 450-20 y 400-20. Este acontecimiento refleja la importancia de saber compactar y dosificar los materiales. Cuando se combinan bien las variables el crecimiento del valor de la resistencia a tracción aumenta a mayor velocidad. Esta distancia entre las tipologías también se produce en la resistencia a compresión, aunque no es tan destacada la diferencia como en este caso. Sin embargo, este efecto no se produce en la densidad y en la permeabilidad. Estos últimos dependen en mayor grado de la porosidad. Lo que provoca que los resultados sean más homogéneos.

Finalmente, el grado de compactación será aislado del resto de variables. Así se podrá ver cuál es el comportamiento del material para la resistencia a tracción en función de la compactación. Para poder interpretar correctamente todos los datos se ha realizado la figura 4.17, con la cual se analizará según el grado de compactación. Tal y como se ha definido anteriormente, la compactación no es el factor determinante para la resistencia a tracción. Los valores de la gráfica son muy heterogéneos lo cual significa que la influencia del grado de compactación es irrelevante si no va acompañado de una disminución de la relación árido/pasta.

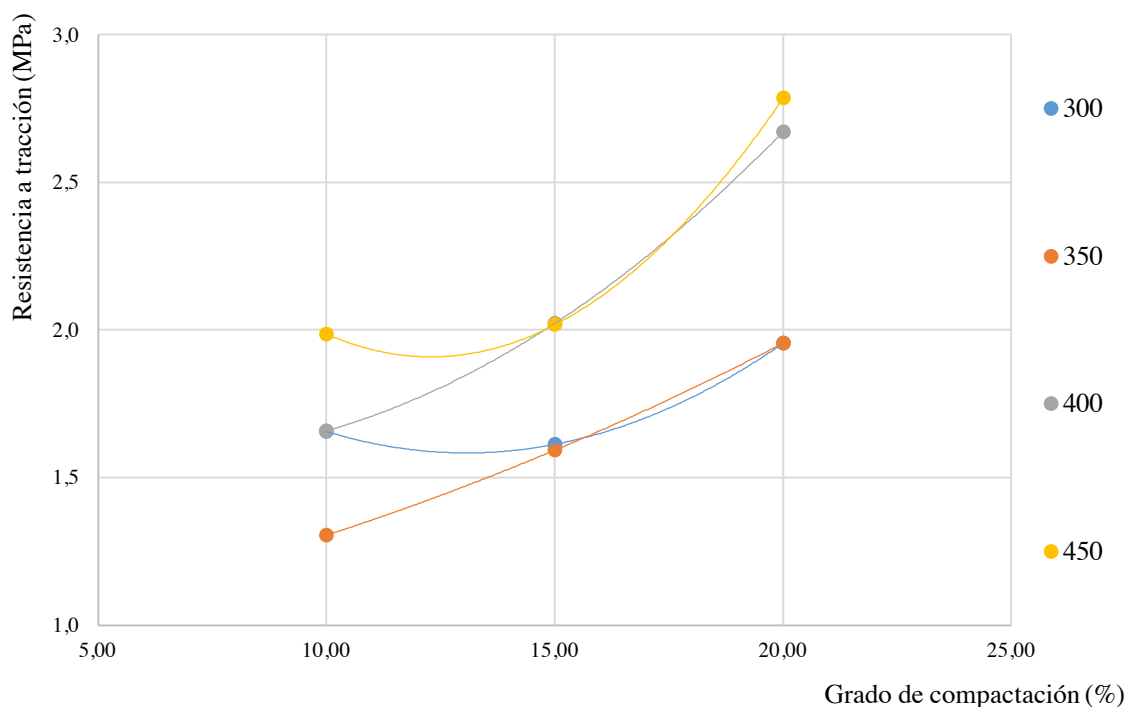


Figura 4.17. Influencia del grado de compactación en la resistencia a tracción del hormigón poroso;

En conclusión, el estudio de la resistencia a tracción desvela que la porosidad es el factor principal para determinar el comportamiento a tracción del material. Sin embargo, como pasa en la resistencia a compresión, el efecto de la compactación y la dosificación de la mezcla son más destacados que en la densidad o la permeabilidad. Además, en el caso de la resistencia a tracción el efecto del aumento de la cantidad de cemento se acentúa aún más que en la compresión.

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

En los últimos 20 años, el interés por el hormigón poroso y sus características ha aumentado considerablemente. Gracias a las investigaciones, se han mejorado las propiedades de este material y la difusión de su conocimiento, y en consecuencia, ha incrementado su uso en nuevas aplicaciones ingenieriles.

Actualmente, los estudios realizados buscan alcanzar la caracterización total del material y una estandarización de los métodos de producción para poder utilizarlo con mayor seguridad y eficacia. Sin embargo, aún existe un gran desconocimiento sobre ciertos parámetros y condiciones.

Por este motivo, se realizó la campaña experimental presentada en este documento. Su objetivo principal fue, como se explica en el apartado 1.3, profundizar en el conocimiento del hormigón poroso y sus propiedades, enfatizando principalmente en los procesos de compactación, permeabilidad y compresión.

Para la evaluación de las hipótesis y el desarrollo de todos los experimentos, se establecieron tres objetivos principales (apartado 1.3): estudiar las propiedades del hormigón poroso (densidad, permeabilidad y resistencia) en función de la porosidad, identificar la influencia del grado de compactación y de la cantidad de cemento en el comportamiento del material y sus propiedades mecánicas e hidráulicas y comparar los resultados obtenidos en la parte experimental con la literatura relacionada.

Así pues, una vez finalizado el proyecto y tras el estudio de todas las propiedades descritas, puede afirmarse que, si bien el hormigón poroso es un material menos resistente que el hormigón convencional, sus características pueden ser positivas para muchos proyectos ingenieriles. Por ejemplo, el estudio de la permeabilidad del material ha permitido confirmar que el uso del hormigón poroso en la construcción de pavimentos que no requieran mucho peso podría ayudar a disminuir un problema en auge, como es el riesgo de las inundaciones en zonas altamente urbanizadas.

Por todo ello, es necesario seguir investigando las características del hormigón poroso y así, en un futuro, poder utilizar el material de forma apropiada para mejorar las condiciones de muchos proyectos ingenieriles.

5.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Las conclusiones específicas muestran la valoración de los resultados de cada una de las propiedades del hormigón poroso estudiadas en este proyecto. Se detallan las conclusiones de la porosidad, la densidad, la permeabilidad y las propiedades mecánicas.

5.2.1 POROSIDAD

La porosidad ha sido estudiada a lo largo del trabajo como la propiedad clave en el desarrollo del material. En el apartado 2.4.1 se introdujeron los conocimientos sobre el las investigaciones anteriores al estudio. En el apartado 3.8.1 se detalló la metodología seguida en la campaña experimental para ensayar las probetas a porosidad. Finalmente, en el apartado 4.3 se mostraron los resultados obtenidos.

Las conclusiones respecto a la porosidad son:

- La porosidad es el elemento clave en la determinación de las propiedades del hormigón poroso. Los principales factores estudiados para evaluar la porosidad han sido el grado de compactación y la cantidad de cemento. Los resultados han mostrado que la porosidad disminuye tanto al aumentar el grado de compactación como al aumentar la cantidad de cemento.
- Otro de los factores clave en la obtención de la porosidad en hormigones porosos son las propiedades del árido. A pesar de esto, al usar el mismo árido en todas las dosificaciones no se ha podido estudiar la influencia de sus propiedades.
- Los resultados de porosidad en los ensayos realizados variaron entre 25% y 44% aproximadamente. Para las dosificaciones analizadas y con el proceso de compactación establecido, los valores de porosidad son demasiado altos respecto a lo establecido en la ACI522 (2010), que señala que las porosidades son aptas cuando los valores están entre 15% y 35%. Estos resultados denotan en qué dosificaciones las variables se pueden ver alteradas para obtener un buen equilibrio en la permeabilidad y la resistencia mecánica del material.
- En cuanto a la cantidad de cemento, se observó que sólo las dosificaciones con 450 kg/m³ (relación árido/pasta de 2,45), independientemente del valor de compactación, fueron capaces de tener valores aptos para la normativa americana.
- Respecto al grado de compactación, sólo las probetas con compactación del 20% (máxima compactación del estudio) fueron capaces de lograr valores de porosidad inferiores al 35%.

5.2.2 DENSIDAD

La evaluación de la densidad era un elemento clave si se quería analizar la compactación, la permeabilidad y la compresión del hormigón poroso.

Las conclusiones respecto a la densidad son las siguientes:

- La densidad es la propiedad que se ve más influenciada por la porosidad. De hecho, ambas tienen una relación inversamente proporcional y prácticamente lineal. Cuando la porosidad aumenta, la densidad disminuye y a la inversa.
- Al depender mucho de la porosidad, los resultados de los ensayos muestran las varianzas más pequeñas del estudio.
- Evaluando las dos variables (grado de compactación y cantidad de cemento) puede observarse que la densidad aumenta tanto con el grado de compactación como con el incremento de la cantidad de cemento. Además, mediante el estudio, también se descubre que la densidad crece más rápidamente a medida que aumenta el grado de compactación.
- En conclusión, en el rango de afectación a la densidad, la porosidad es la característica que más influye, seguida del grado de compactación y finalmente de la cantidad de cemento.

5.2.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Uno de los pilares de este estudio ha sido también la evaluación de la permeabilidad del hormigón poroso. La permeabilidad es la gran distinción del hormigón poroso, ya que éste es el único hormigón con gran capacidad de filtración de agua a través de su estructura interna.

Las conclusiones respecto a la permeabilidad son las siguientes:

- La permeabilidad aumenta con el crecimiento de la porosidad. A pesar de esto, aunque su influencia es clave, en este caso, su relevancia es menor que en el caso de la densidad.
- Como la permeabilidad depende también de la conexión y estructura interna de los poros, aunque el valor de porosidad sea el mismo, la permeabilidad puede variar. Así pues, la relación entre porosidad y permeabilidad no es prácticamente directa, como en el caso de la densidad.
- Evaluando las dos variables (grado de compactación y cantidad de cemento) puede observarse que la permeabilidad disminuye tanto con el grado de compactación como con el incremento de la cantidad de cemento. Así pues, como se ha comentado, en términos generales, con la modificación de estas variables la permeabilidad se ve afectada igual que la porosidad.

- En conclusión, en el rango de afectación a la permeabilidad, la porosidad influye menos que en el caso de la densidad y, en cambio, el grado de compactación y la cantidad de cemento son mucho más relevantes.

5.2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

En cuanto a las propiedades mecánicas, en este estudio se han evaluado la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción.

Las conclusiones respecto a estas propiedades son las siguientes:

- Las propiedades mecánicas disminuyen con el aumento de la porosidad. De hecho, este es uno de los principales problemas que presenta este material a la hora de buscar sus potenciales usos.
- La influencia de la porosidad sobre las propiedades mecánicas disminuye respecto a las otras propiedades estudiadas. Esto es debido a que en el caso de las propiedades mecánicas, otro factor entra en juego: el contacto entre el árido y la pasta.
- El contacto árido-pasta es un factor clave para las resistencias mecánicas porque en ese punto es donde se producen la mayoría de las roturas. Por esto, para tener un contacto árido-pasta consistente es necesario un buen proceso de compactación y una dosificación de los materiales eficiente.
- En consecuencia, la influencia del grado de compactación y de la cantidad de cemento aumenta en el caso de las propiedades mecánicas.

5.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

El camino del hormigón poroso en el mundo ingenieril no ha hecho nada más que empezar. Recientemente, las investigaciones y su aplicación en suelos y pavimentos han aumentado considerablemente. La figura 5.1 muestra el crecimiento en las investigaciones sobre el hormigón poroso en los últimos años.

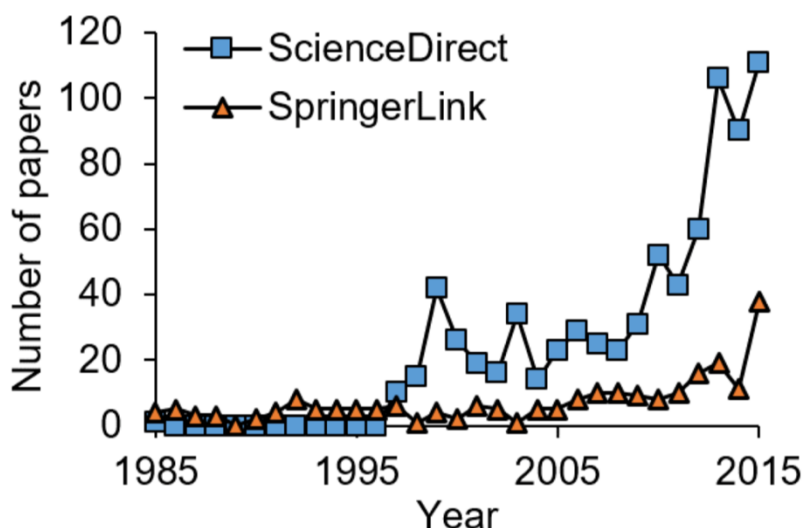


Figura 5.1. Número de investigaciones científicas en los últimos 20 años [Pieralisi (2016)];

Así pues, sin ninguna duda, el hormigón poroso es un material cuyo uso está en alza. Por este motivo, es necesario que se le dedique más interés y trabajo experimental y así poder lograr que se aprovechen todos sus beneficios y aplicaciones.

Para lograr la expansión dentro del sector, el hormigón poroso debe afianzarse como una alternativa real al hormigón convencional en pavimentos y suelos. Además, esto permitiría reducir enormemente el riesgo durante las inundaciones en las áreas urbanizadas y sus gravísimas consecuencias.

Si bien es cierto que la falta de resistencia del hormigón poroso es un obstáculo para su implementación a nivel global, con el aumento de las investigaciones y los experimentos, este problema podría solucionarse a corto-medio plazo.

De hecho, una vez se alcance la consolidación de su uso en pavimentos y suelos, el hormigón poroso podría avanzar hacia una meta más ambiciosa: las aplicaciones estructurales. Eso sí, para ello sería necesario que las investigaciones crecieran considerablemente tanto en número como en calidad.

Por esto, para poder seguir afianzando el hormigón poroso como un material con futuro, será necesario que también se evalúen a fondo los procesos de producción: dosificación, compactación, curado y almacenamiento ya que, en su evaluación es donde se hallan las claves para el desarrollo del material y las soluciones para que éste se convierta en un material de referencia.

REFERENCIAS

- (ACI Commitee 522; 2010) *ACI 522R - 10: Report on Pervious Concrete.*
- (AENOR; 2008) *UNE 83951: 2008: Durabilidad del hormigón. Aguas de amasado y aguas agresivas. Toma de muestras.*
- (AENOR; 2009) *UNE-EN 12504 - 1: 2009: Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión.*
- (AENOR; 2009) *UNE-EN 12390 - 3: 2009: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.*
- (AENOR; 2009) *UNE-EN 13263 - 1: 2006+A1:2009: Humo de sílice para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad.*
- (AENOR; 2010) *UNE-EN 12390 - 6: 2010: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.*
- (AENOR; 2010) *UNE-EN 934 - 2: 2010: Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.*
- (AENOR; 2011) *UNE-EN 197 - 1:2011: Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*
- (AENOR; 2012) *UNE-EN 933 - 1: 2012: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.*
- (AENOR; 2012) *UNE-EN 933 - 3: 2012: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.*
- (AENOR; 2013) *UNE-EN 450 - 1: 2013: Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad.*
- (AENOR; 2013) *UNE-EN 12390 - 1: 2013: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes.*
- (Agar-Ozbek, A., et al; 2013) *Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales, Construction and Building Materials; 41; 480-490.*

- (Ahmed, I., et al; 2014) *Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties*, Construction and Building Materials; 50; 524-529.
- (Aoki, Y., et al; 2012) *Properties of pervious concrete containing fly ash*, Road Materials and Pavement Design; 13 (1); 1-11.
- (ASTM; 2007) *ASTM C127 - 07: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*.
- (ASTM; 2011) *ASTM D7063 / D7063M - 11: Standard test method for effective porosity and effective air voids of compacted bituminous paving mixture samples*.
- (ASTM; 2012) *ASTM C1754 / C1754M - 12: Standard test method for density and void content of Hardened Pervious Concrete*.
- (Barnhouse, P.W., et al; 2016) *Material characterization and hydraulic conductivity modelling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete*, Construction and Building Materials; 110; 89-97.
- (Bhutta, M., et al; 2012) *Evaluation of high-performance porous concrete properties*, Construction and Building Materials; 31; 67-73.
- (Chen, Y., et al; 2013) *Strength, fracture and fatigue of pervious concrete*, Construction and Building Materials; 42; 97-104.
- (Cosic, K., et al; 2015) *Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete*, Construction and Building Materials; 78; 69-76.
- (Cundall, P. A., et al; 1979) *A discrete numerical model for granular assemblies*, Geotechnique; 29; 47-65.
- (ECLAP; 2016) *TEMA 06: Materiales más comunes en la construcción y conservación de carreteras*.
- (Gesoglu, M., et al; *Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers*, Construction and Building Materials; 63; 206-213.
- (Ghafoori, N., et al; 1995) *Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials*, Journal of Materials in Civil Engineering; 183-191.
- (Hesami, S., et al; 2014) *Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement*, Construction and Building Materials; 53; 680-691.
- (Huang, B., et al; 2010) *Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete*, Construction and Building Materials; 24 (5); 818-823.

- (Ibrahim, A., et al; 2014) *Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties*, Construction and Building Materials; 50; 524-529.
- (Kim, H., et al; 2010) *Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete*, Applied Acoustics; 71 (7); 607-615.
- (Lian, C., et al; 2010) *Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation*, Construction and Building Materials; 24 (12); 2664-2671.
- (Luck, J., et al; 2009) *Consequences of manure filtration through pervious concrete during simulated rainfall events*, Biosystems Engineering; 102 (4); 417-423.
- (Ministerio de Fomento; 2008) *EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural*.
- (Pieralisi, R.; 2016) *Characterization and Modelling of Pervious Concrete*, Tesis Doctoral, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- (Shu, X., et al; 2011) *Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures*, Construction and Building Materials; 25 (8); 3187-3192.
- (Suleiman, M.T., et al; 2006) *Effect of compaction energy on pervious concrete properties*, Proceedings of the 2006 NRMCA Concrete Technology Forum – Focus on Pervious Concrete, Nashville, TN.
- (Tho-in, T., et al; 2012) *Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete*, Construction and Building Materials; 30; 366-371.
- (Vancura, M., et al; 2011) *Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate*, Cement and Concrete Composites; 33 (10); 1080-1085.
- (Vázquez-Rivera, N., et al; 2015) *Optimization of pervious concrete containing fly ash and iron oxide nanoparticles and its application for phosphorus removal*, Construction and Building Materials; 93 (15); 22-28.
- (Venteo, O.; 2014) *Estudio numérico y experimental sobre la compactación de hormigones porosos*, Trabajo Final de Grado, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- (Vorosmarty, C.J., et al; 2010) *Global threats to human water security and river biodiversity*, Nature; 467; 555-561.
- (Yang, J., et al; 2003) *Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials*, Cement and Concrete Research; 33 (3); 381-386.

(Zhong, R., et al; 2015) *Material design and characterization of high performance pervious concrete*, Construction and Building Materials; 98; 51-60.